

다자유도 곡선 맞춤법과 RKU 기법을 이용한 점탄성 감쇠재의 탄성 및 손실계수 추정방법 연구

민천홍* · 박한일** · 배수룡*** · 전재진***

*한국해양대학교 대학원

**한국해양대학교 해양공학과

***국방과학연구소

Study of the Measurement of Young's Modulus and Loss Factor for a Viscoelastic Damping Material Using a Multi Degree of Freedom Curve Fitting Method and RKU Equation

Cheon-Hong Min*, Han-Il Park**, Soo-Ryong Bae*** and Jae-Jin Jeon***

*Graduate School of Korea Maritime University, Busan, Korea

**Department of Ocean Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

***Agency of Defense Development, Jinhae, Korea

KEY WORDS: Curve-fitting 곡선맞춤, Loss factor 손실계수, Viscoelastic damping material 점탄성 감쇠재, Young's modulus 탄성계수, Vibration analysis 진동해석

ABSTRACT: Offshore structures, such as a platform, a buoy, or a floating vessel, are exposed to several dynamic loads, and viscoelastic damping material is used to reduce the vibration of offshore structures. It is important to know the properties of viscoelastic materials because loss factor and Young's modulus of the viscoelastic damping material are dependent on frequency and temperature. In this study, an advanced technique for obtaining accurate loss factor and Young's modulus of the viscoelastic damping material is introduced based on a multi degree of freedom curve-fitting method and the RKU (Ross-Kerwin-Ungar) equations. The technique is based on a modified experimental procedure from ASTM E 756-04. Loss factor and Young's modulus of the viscoelastic damping material are measured for different temperatures by performing the test in a temperature-controlled vibration measurement room where temperature varies from 5 to 45 degrees Celsius.

1. 서 론

해양구조물은 대형 엔진으로부터 발생하는 내부 가진력과 파도, 조류, 바람에 의해 발생하는 외부가진력 등의 다양한 진동 원인에 노출되어 있다. 현재, 진동을 줄이기 위하여 점탄성 감쇠재를 적용하여 감쇠성능을 높이는 경우가 늘고 있다. 점탄성 감쇠재는 재료에 따라 탄성 계수와 손실계수가 달라진다. 이러한 이유로 기존의 유한요소 프로그램을 사용하기 위해서는 실험을 통해 감쇠재의 탄성계수와 손실계수를 미리 구하여야 한다.

최근 해양자원 개발을 위하여 심해저 및 북극해 지역에 많은 해양구조물이 설치되고 있고 있다. 이러한 지역은 다른 지역에 비하여 온도차가 크게 발생한다. 이러한 온도변화는 구조물의 진동저감을 위하여 사용된 점탄성 감쇠재의 탄성 및 손실계수를 변화시킨다. 이러한 결과 구조물의 강성이 변화하고 감쇠성능이 변화하여 구조물의 구조적인 문제를 발생시킬 수 있다. 그

러므로 점탄성 감쇠재질의 복합재를 사용한 구조물은 설계 시 온도변화에 따른 구조특성 변화를 반영하여야 한다.

점탄성 감쇠재의 탄성계수와 손실계수를 온도별로 추정하는 많은 연구들이 선행되어 왔다. Nashif(1985) 및 Jones(2001)은 점탄성 감쇠재의 탄성계수 및 손실계수의 실험추정기법을 연구하였다. 최현과 이정운(1999)은 비공진법을 사용하여 좁은 주파수 영역에서 손실계수를 측정하였다. 비공진법은 손실계수를 주파수에 대한 연속함수형태로 측정할 수 있는 장점이 있으나, 측정주파수내에 공진점이 존재한다면 실험 결과의 정확도가 크게 떨어지는 단점을 가지고 있기도 하다. 김사수 등(1999)은 공진법을 사용하여 손실계수를 추정하였다. 감쇠재의 온도특성을 측정하는 실험은 우창수 등(2002)에 의해 수행되었다. 우창수 등(2002)은 비공진법을 사용하여 방진고무의 온도변화에 따른 동특성 변화를 측정하였다. 이장명과 이준 (2001)은 비접촉센서와 가진기를 사용하여 실험을 수행하였다. ASTM E 756-04

(2004)는 점탄성 감쇠재의 탄성 및 손실계수 추정기법을 제시하고 있고 박한일 등(2007)은 ASTM 기법을 부분적으로 수정한 방법을 제시하였다. 또한, 기존의 연구보다 더 정확한 계측을 위하여 Park et al.(2008)은 다자유도 곡선맞춤법과 RKU 기법을 적용한 공진법을 사용하여 점탄성 감쇠재의 탄성 및 손실계수를 추정하였다. 본 연구에서는 두께가 다른 시편을 이용하여 기존 공진법의 단점인 참조점 부족을 해결하여 더욱 정확한 탄성 및 손실계수를 추정기법을 제안한다.

2. 환경요인에 따른 점탄성 감쇠재의 특성변화

점탄성 감쇠재의 탄성계수와 손실계수는 온도와 가진 주파수 변화에 따라 값이 변하는 특성을 가진다. 따라서 이러한 특성을 가지는 점탄성 감쇠재를 사용하는 복합재의 구조해석 시 온도와 주파수 변화에 따른 특성을 미리 파악할 필요가 있다.

일반적으로 온도는 점탄성 감쇠재의 감쇠 성능에 가장 많은 영향을 미치는 요인으로 평가되고 있다. Fig. 1(ASTM E 756-04, 2004)은 온도에 따른 손실계수와 탄성계수를 나타내고 있다.

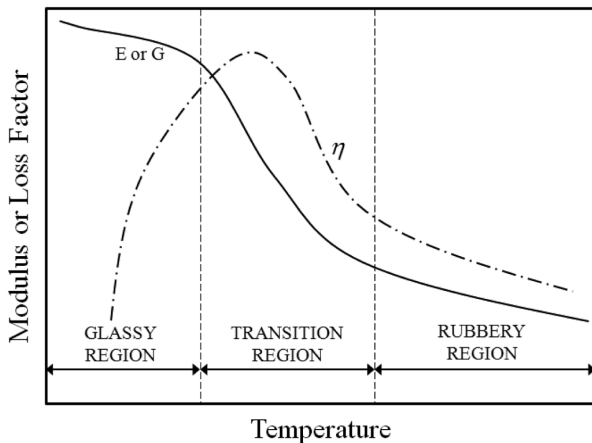


Fig. 1 Variation of elastic modulus and material loss factor with temperature

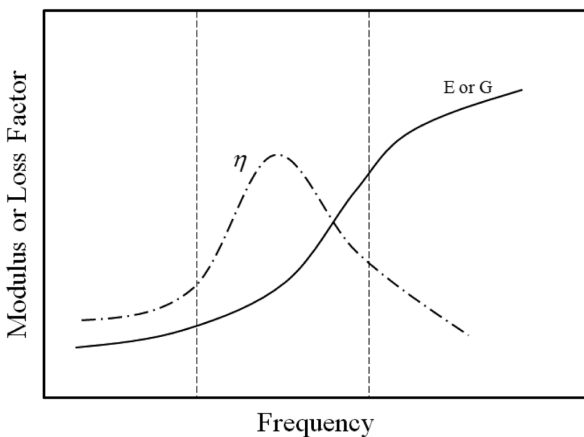


Fig. 2 Variation of elastic modulus and material loss factor with frequency

Fig. 1은 점탄성 물질에 한해서 적용되며 다른 물질의 경우에는 온도에 따른 경향이 조금씩 달라질 수 있다. 각각의 범위는 유리영역(Glassy region), 전이영역(Transition region), 고무영역(Rubbery region)으로 나누어 진다. 고무영역을 벗어나는 영역을 유체영역(Flow region)이라고 하며, 이 영역은 온도가 올라감에 따라 물질이 녹으면서 부드러워지며 손실계수가 매우 커지는 영역이다. 대부분으로 점탄성 감쇠재에 있어서 유체영역은 나타나지 않는다.

Fig. 2(ASTM E 756-04, 2004)는 주파수 변화에 따른 점탄성 감쇠재의 탄성계수와 손실계수의 변화 경향을 보여준다. 주파수가 증가함에 따라 탄성계수도 증가하는 추세를 보인다. 손실계수의 경우 온도변화 특성과 같이 세 부분으로 나누어 설명할 수 있다.

3. 곡선맞춤

본 연구에서는 점탄성 감쇠재의 진동 특성을 파악하기 위한 곡선맞춤법을 제시한다. 우선 구조물의 진동특성은 비비례 감쇠 시스템(Nonproportional damping system)으로 가정하였다. ASTM에서는 실험데이터를 곡선맞춤하기 위한 기법으로 일자유도 곡선맞춤 기법을 제시하고 있다. 일자유도 곡선맞춤은 사용하기에는 매우 편리하지만, 많은 오차를 포함하기 때문에 해석 결과의 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 NLLS(Non-linear least square)법(민천홍 등, 2008a; 2008b; 2009)을 곡선맞춤기법으로 사용하였다. 본 논문에서는 NLLS기법을 간단히 소개한다. 비비례 감쇠 시스템의 가속도 전달함수는 식 (1)과 같다.

$$L(\omega) = \sum_{r=1}^n \left\{ \frac{-\omega^2(U_r + jV_r)}{j(\omega - \omega_{dr}) + \sigma_r} + \frac{-\omega^2(U_r - jV_r)}{j(\omega + \omega_{dr}) + \sigma_r} \right\} + C + jD - \omega^2 E - j\omega^2 F \quad (1)$$

여기서, ω 는 주파수(Frequency), ω_{dr} 은 감쇠고유진동수(Damped natural frequency), $\sigma_r = \omega_{nr}\zeta_r$ 로 정의되는 모드감쇠율(Modal delay rate)이다. 또한 U_r, V_r 은 각각 모드형상의 실수부와 허수부를 나타낸다. 일반적으로 실험범위는 제한된 범위를 가진다. 그러므로 제한된 영역에 의해 발생하는 오차를 나타내는 항을 포함하여야 한다. 식 (1)의 C, D 는 추가질량(Residual mass)의 실수부와 허수부를 각각 표현한다. 또한 E, F 는 추가강성(Residual stiffness)의 실수부와 허수부를 각각 표현한다. 진동 실험에 의해 주어지는 전달함수의 실험데이터를 식 (1)의 형태로 표현하기 위해서는 식 (1)중의 $4n+4$ 개의 미지수 즉, $\omega_{dr}, \sigma_r, U_r, V_r, C, D, E, F$ 가 필요하다. 이것들을 통합하여 $\gamma_n(h=1\sim 4n+4)$ 로 하고 이들의 초기치를 γ_{ns} 라 하면 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\gamma_n = \gamma_{ns} + \Delta\gamma_n \quad (2)$$

식 (2)를 $\Delta\gamma_n$ 에 관해 테일러급수 전개하고 근사적으로 1차 항까지 취하면 다음과 같다.

$$L(\omega, \gamma_h) \approx L(\omega, \gamma_{hs}) + \sum_{h=1}^{4n+4} \frac{\partial L}{\partial \gamma_h}(\omega, \gamma_{hs}) \cdot \Delta \gamma_h = A_{Re} + jA_{Im} \quad (3)$$

m개의 각진동수 ω 에 대해, 실험에 의해 accelerance의 실수부 $L_{Rei} = L_{Re}(\omega = \omega)$, 허수부 $L_{Imi} = L_{Im}(\omega = \omega)$ 가 데이터로 얻어진다 고 하자. 또 근사식의 실수부와 허수부를 각각 A_{Rei}, A_{Imi} 로 하자. 이때의 오차함수는 실수부와 허수부 오차의 제곱으로 정의 할 수 있으므로 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda = \sum_{i=1}^m \{ (L_{Rei} - A_{Rei})^2 + (L_{Imi} - A_{Imi})^2 \} \quad (4)$$

λ 를 $\Delta \gamma_h$ 로 미분하고 0으로 두면 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \Delta \gamma_h} = 2 \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{\partial A_{Rei}}{\partial \Delta \gamma_h} (A_{Rei} - L_{Rei}) + \frac{\partial A_{Imi}}{\partial \Delta \gamma_h} (A_{Imi} - L_{Imi}) \right\} = 0 \quad (5)$$

이 방정식을 풀면 초기치 값에 대한 변수의 값을 구할 수 있다. 이를 반복적으로 구하면 원하는 값에 수렴하게 된다.

4. ROSS-KERWIN-UNGAR EQUATION

다른 특성을 가지는 복합재의 특성을 표현하기 위하여 많은 연구들이 수행되어왔다. 특히, Fig. 3(Nashif, 1985)과 같은 한쪽 면에 감쇠재가 부착된 시편의 경우 Ross, Unger, Kerwin에 의해 연구된 Ross-Kerwin-Ungar(RKU)기법이 널리 사용되고 있다. RKU기법은 다음과 같다.

$$\frac{EI}{E_1 I_1} = \frac{1 + 4e_2 h_2 + 6e_2 h_2^2 + 4e_2 h_2^3 + e_2^2 h_2^4}{1 + e_2 h_2} \quad (6)$$

$$\frac{\eta}{\eta_2} = \frac{e_2 h_2 (3 + 6h_2 + 4h_2^2 + 2e_2 h_2^3 + e_2^2 h_2^4)}{(1 + e_2 h_2)(1 + 4e_2 h_2 + 6e_2 h_2^2 + 4e_2 h_2^3 + e_2^2 h_2^4)} \quad (7)$$

여기서, E_1 는 기초빔의 탄성계수, E_2 는 감쇠재의 탄성계수, E 는 복합재의 탄성계수, $e_2 = E_2/E_1$, $h_2 = H_2/H_1$ 이고, η_1 는 기초빔의 손실계수, η_2 는 감쇠재의 손실계수, η 는 복합재의 손실계수이다.

5. 실험검증

5.1 실험장치 구성 및 실험방법

점탄성 감쇠재의 탄성 및 손실계수 추정을 위하여 다음과 같은 외팔보 실험을 수행하였다. 외팔보는 기초층의 경우 강철을 사용하고 고정부 부분을 10mm로 두껍게 하여 외팔보의 경계조

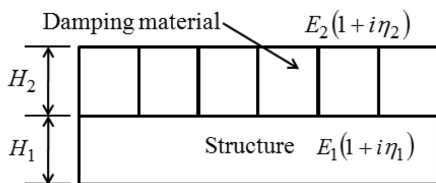


Fig. 3 Free layer damping treatment



Fig. 4 Test specimens

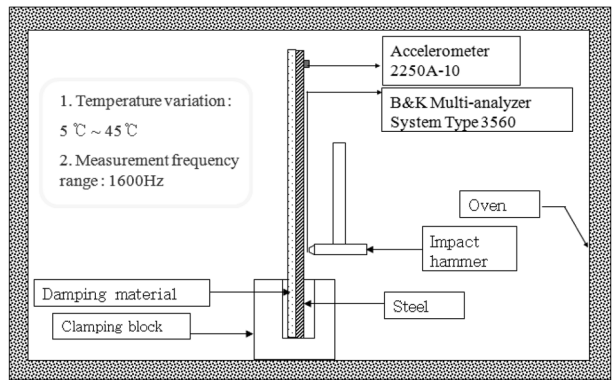


Fig. 5 Experimental equipment set up

건을 만족 시키도록 제작되었다. ASTM에서는 기초층의 두께는 1~3mm, 폭은 10mm, 길이는 180~250mm로 제안하고 있다. 그러나 폭이 10mm인 경우 크기가 매우 작아지기 때문에 충격망치의 사용이 어려워지는 등의 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고자 본 연구에서는 크기를 조정하여 사용하였다. 기초층의 두께는 1~4mm, 폭은 20mm, 길이는 290mm로 실제 고정부의 길이 4mm를 제외한 보의 길이는 250mm가 된다. 감쇠재를 한쪽면에 부착하였다. 부착된 감쇠재는 국내의 A사에서 생산된 두께 4mm, 밀도 2000kg/m³의 체진성 방진 시트를 사용하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 시편을 보여준다.

온도를 5, 25, 40°C로 변화 시키가며 각각의 온도에서 모드해석을 수행하였다. 각 모드해석은 다음과 같이 수행되었다. 시편의 고정부분 10mm 앞에서 충격망치(Impact hammer)를 사용하여 가진하고 가속도계 센서를 시편 끝점에 부착하여 응답 가속도를 계측 하였다. 한 점당 3번의 반복 실험을 수행하고 평균 값을 데이터로 사용하였다. 실험에 사용된 FFT 분석기는 B&K사의 2채널 3560B를 사용하였다. Fig. 5에 실험장치 구성도를 나타내었다.

5.2 곡선맞춤

곡선맞춤의 첫 단계는 NLLS기법을 이용하여 각 점을 곡선맞춤하는 것이다. NLLS기법을 이용한 곡선맞춤의 자세한 방법은 참고문헌(Park et al., 2008)에 주어져 있다. Figs. 6~7은 25°C에

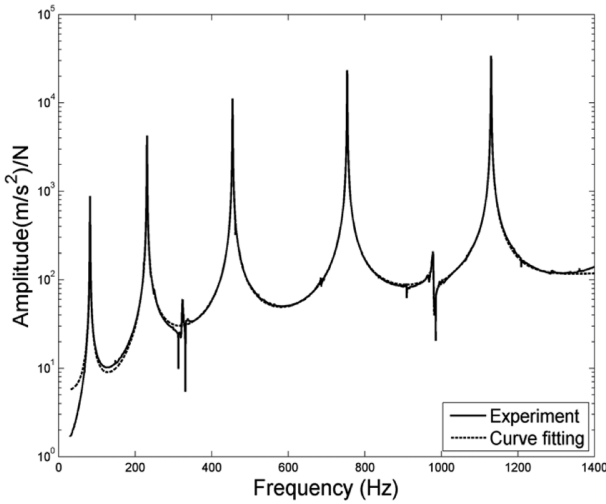


Fig. 6 Curve fitted plot of AFTF for 1 mm thickness of uniform beam by NLLS method at 25°C

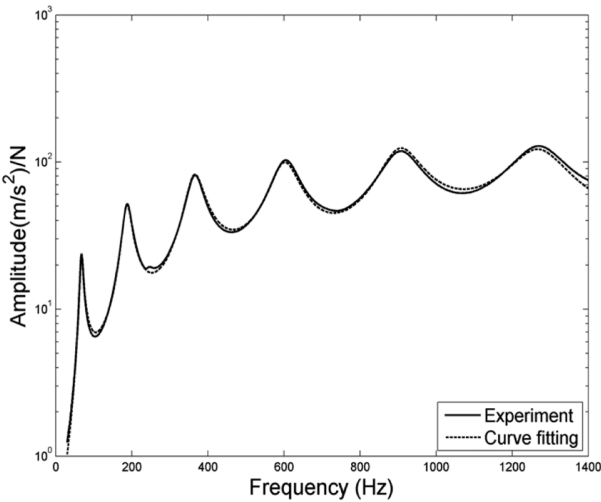


Fig. 7 Curve fitted plot of AFTF for composite beam based on 1 mm thickness of uniform beam by NLLS method at 25°C

Table 1 Measured mode frequencies for different thickness of uniform beams

| Thickness of uniform beams | Frequency (Hz) | | | | |
|----------------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|
| | 2nd_mode | 3rd_mode | 4th_mode | 5th_mode | 6th_mode |
| 1 mm | 67.51 | 187.18 | 364.99 | 601.95 | 905.38 |
| 2 mm | 138.99 | 388.09 | 758.16 | 1251.7 | - |
| 3 mm | 218.89 | 611.27 | 1194.3 | - | - |
| 4 mm | 292.89 | 817.88 | - | - | - |

서 1mm 시편의 기초빔과 복합빔의 곡선맞춤 결과를 보여준다. 그림의 실선은 실험을 통해 구해진 가속도 주파수 전달함수 (Accelerance frequency transfer function, AFTF)를 나타내고 점선은 곡선맞춤을 통해 구해진 주파수전달함수를 나타낸다.

실선과 점선의 부합성이 매우 높기 때문에 곡선맞춤의 정확성이 매우 높음을 확인할 수 있다. 이러한 곡선맞춤은 각각의 온도에서 1~4mm의 시편에 대하여 반복하여 수행되었다.

1600Hz 범위에서 1~4mm 시편에서 각각 5개, 4개, 3개, 2개의 총 14개의 모드가 측정되었다. 기존의 방법에 비하여 최대 7배의 참조점이 늘었다. 이 결과, 탄성 및 손실계수 추정 정확도가 향상 되었다. Table 1은 25°C에서 복합시편의 두께별 측정된 모드를 보여준다.

5.3 온도변화에 따른 손실계수 변화

Fig. 8은 온도변화에 따른 감쇠재의 손실계수 변화를 보여준다. 최소제곱법을 사용하여 데이터를 추정하였다. 700Hz를 기준으로 저주파수영역에서는 온도가 낮을수록 손실계수가 크게 나타나고 고주파수영역에서는 온도가 높을수록 손실계수가 크게 나타났다. 온도변화에 따라 손실계수가 크게는 0.3 이상 차이가 남을 알 수 있다. 이러한 변화는 구조물의 진동저감 성능을 크게 변화시킬 수 있으므로 구조해석 시 온도변화에 따른 감쇠재의 손실계수 변화를 고려하여야 한다.

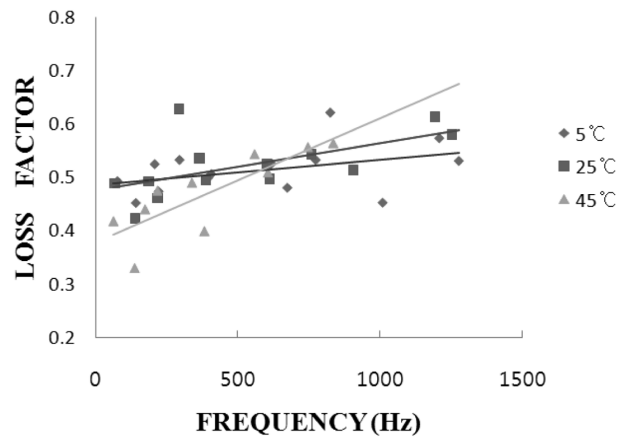


Fig. 8 Loss factor of visco-elastic damping material for different temperature

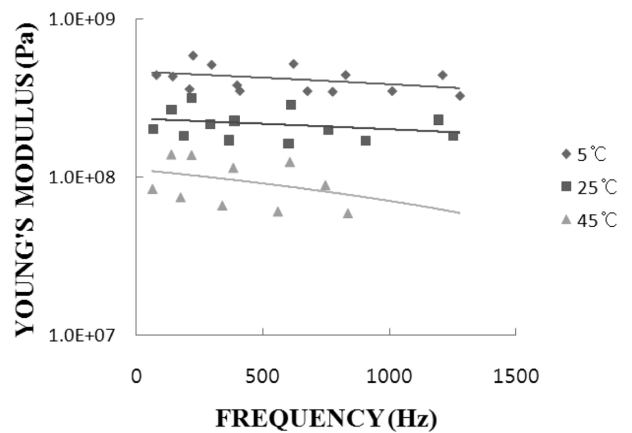


Fig. 9 Young's modulus of visco-elastic damping material for different temperature

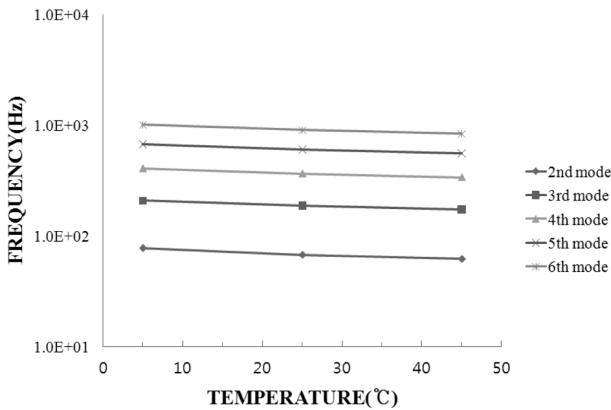


Fig. 10 Natural frequency of 1mm composite beam for different with temperature

Table 2 Natural frequencies of 1 mm composite beam

| | Frequency (Hz) | | | | |
|------|----------------|----------|----------|----------|----------|
| | 2nd_mode | 3rd_mode | 4th_mode | 5th_mode | 6th_mode |
| 5°C | 77.5138 | 208.4601 | 407.3346 | 674.5127 | 1009.7 |
| 25°C | 67.5133 | 187.1807 | 364.9974 | 601.9468 | 905.3783 |
| 45°C | 62.0885 | 173.1094 | 338.0776 | 558.1955 | 835.2542 |

5.4 온도변화에 따른 탄성계수 변화

Fig. 9는 온도변화에 따른 감쇠재의 탄성계수 변화를 보여준다. 온도 및 주파수가 상승하면 감쇠재의 탄성계수는 감소함을 보여준다. 특히 온도변화에 따른 탄성계수의 변화가 큼을 확인할 수 있다. 이러한 탄성계수 변화로 인하여 강성이 변화기 때문에 구조해석 시 온도변화에 따른 강성의 변화를 고려하여야 한다. 더욱이 감쇠재는 구성 물질에 따라 재료특성이 달라진다. 때문에 Fig. 2와 같은 일반적인 경우와는 다른 경우도 발생할 수 있다. 이러한 감쇠재의 특성 때문에, 감쇠재의 온도변화에 따른 탄성계수 변화는 반드시 추정되어야 한다.

5.5 온도변화에 따른 고유진동수 변화

Fig. 10은 온도변화에 따른 1mm 감쇠 복합재의 고유진동수(Undamped natural frequency) 변화를 보여준다. 온도가 증가할수록 고유진동수는 낮아지는 것을 알 수 있다. Table 2를 보면, 5°C와 45°C의 온도변화에 고유진동수가 15% 이상 변화는 것을 알 수 있다. 이러한 변화 때문에, 온도변화가 있는 환경에 놓여있는 구조물의 구조해석에는 온도변화에 따른 고유진동수 변화를 반드시 고려하여야 한다. 더욱이 이러한 변화는 감쇠재의 특성에 따라 달라짐으로 사용되는 감쇠재 마다 실험을 통해 변화 특성을 파악하여야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 점탄성 감쇠재의 탄성 및 손실계수 추정방법을 제시하였다. 기존의 ASTM E 756-04 방법과 비교하여 실험 장치 구성에서 개량된 사항은 다음과 같다. 충격망치를 사용하

여 가진함으로써 가진기(Exciter)를 시편에 연결하였을 때 스타팅 거로부터 발생할 수 있는 부가질량에 의한 오차와 시편에 뚫린 구멍으로 인한 오차를 줄였다. 시편의 루트 부분을 볼트접합 방식으로 제작하여 시편제작을 용이하게 하였다. 시편의 크기를 증가시켜 실험의 편이성을 증가 시켰다.

해석방법에서 개량된 사항은 다음과 같다. 실험 데이터를 NLLS법으로 해석함으로써 보다 정확한 진동 특성치를 구하였다. 참조점의 개수를 늘리기 위하여 시편의 두께를 바꿔가며 실험을 수행하였다. 그 결과 더욱 정확한 감쇠재의 탄성 및 손실계수를 추정할 수 있었다.

온도변화에 따라 점탄성 감쇠재의 손실계수는 최대 0.3이상의 변화를 보여주었다. 이러한 결과는 점탄성 감쇠재가 부착된 복합구조물의 온도에 따른 진동저감 성능의 변화를 나타낸다. 그러므로 점탄성 감쇠재가 사용된 복합구조물의 구조해석 시 온도에 따른 손실계수 변화를 고려하여야 한다. 또한, 점탄성 감쇠재의 탄성계수와 고유진동수가 온도에 따라 변화기 때문에 강성의 변화를 유발한다. 이러한 변화를 구조해석 시 반드시 고려하여야 오차를 줄일 수 있다.

더욱이, 점탄성 감쇠재는 재료에 따라 탄성계수 및 손실계수가 변하기 때문에 감쇠재 종류마다 실험을 수행하여 그 해석 결과를 데이터베이스화 하여 사용할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 국방부가 지원한 수중운동체 특화연구센터(UVRC)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김사수, 조대승, 이민우 (1999). “굽힘진동 감쇠를 위한 점탄성 적층보의 최적 설계”, 대한조선학회 논문집, 제36권, 제1호, pp 90-98.

민천홍, 박한일, 배수룡 (2008a). “다자유도 곡선맞춤법을 이용한 감쇠보 모델의 실험 진동해석”, 한국해양공학회지, 제22권, 제1호, pp 70-74.

민천홍, 박한일, 배수룡 (2008b). “비선형 최소제곱법을 이용한 점탄성 감쇠를 갖는 원통셀의 실험진동해석”, 한국해양공학회지, 제22권, 제3호, pp 41-46.

민천홍, 박한일, 배수룡, 전재진 (2009). “주파수 전달함수를 이용한 신 포괄 곡선맞춤법”, 한국해양공학회지, 제23권, 제6호, pp 82-86.

박한일, 손재근, 민천홍, 배수룡 (2007). “복합재의 탄성 및 감쇠 계수 측정을 위한 실험연구”, 대한조선학회 논문집, 제44권, 제1호, pp 26-31.

우창수, 김완두, 김기세, 권재도 (2002). “실험에 의한 방진고무의 동특성에 관한 연구”, 한국고무학회 Elastomer, 제 37권, 제3호, pp 183-191.

이장명, 이준 (2001). “2층형 제진가진 강판을 이용한 온도 조건에 따른 제진재의 손실계수 및 탄성계수 측정”, 한국소음진

- 동공학회 논문집, 제11권, 제9호, pp 391-397.
- 최현, 이정윤 (1999). “점탄성 재료의 손실계수 측정에 관한 연구”, 경기대학교 산업기술종합연구소 논문집, 제18권, pp 113-124.
- ASTM E 756-04 (2004). Standard test method for measuring vibration-damping properties of materials, ASTM.
- Jones, D.I.G. (2001). Handbook of viscoelastic vibration damping, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Nashif, A.D. (1985). Vibration Damping, Jon Wiley & Sons, Inc.
- Park, H.I., Min, C.H. and Bae, S.R. (2008). “Accurate Measurement of Loss Factor and Young’s Modulus for a Composite Structure using a Multi Degree of Freedom Curve-Fitting Method”, Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, Vancouver, Canada, 390-395.

2010년 5월 13일 원고 접수

2011년 1월 31일 심사 완료

2011년 2월 1일 게재 확정