

점탄성 복합재의 온도 변화에 따른 모드 형상 비교

민천홍* · 손재근* · 박한일** · 배수룡***

*한국해양대학교 대학원

**한국해양대학교 해양개발공학부

***국방과학연구소

A Mode Shape Comparison of Viscoelastic Composite Material on Temperature Change

CHEON-HONG MIN^{*}, JAE-GEUN SHON^{*}, HAN-IL PARK^{**} AND SU-RYONG BAE^{***}

^{}Graduate school of Korea Maritime University, Busan, Korea*

^{}Division of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea*

*^{**}Agency for Defense Development, Jinhae, Korea*

KEY WORDS: Composite beam 복합재, Viscoelasticity 점탄성, Mode shape(모드형상), Oberst beam 오베르스트 보, Experimental modal analysis 실험모드 해석

ABSTRACT: 점탄성 복합재는 간단한 작업으로 큰 감쇠 효과를 볼 수 있어 사용이 날로 늘어나고 있다. 그런데 점탄성 복합재의 특성은 온도에 민감하게 반응하며 변화한다. 그러므로 점탄성 복합재의 모드해석 시 온도 변화에 따른 해석이 필요하다. 본 논문에서는 한 쪽면에 점탄성재를 부착한 Oberst beam을 일단고정 상태로 설치하여 실험 온도를 -15~45℃로 변화시켜가며 전달함수를 이용하여 실험모드해석을 실행하였다. 그리고 온도 차이에 따른 모드형상을 비교하였다.

1. 서 론

현재 잠수함이나 선박의 기계에 의한 소음이나 진동을 줄여 주기 위하여 여러 가지 연구가 진행되고 있다. 특히 점탄성 복합재는 간단한 작업으로 큰 감쇠 효과를 볼 수 있어 사용이 날로 늘어나고 있다. 그런데 점탄성 복합재의 특성은 주파수와 온도에 민감하게 반응하여 변화한다(박한일 등, 2005). 그러므로 점탄성 복합재로 구성된 구조물에는 유한요소법과 같은 구조해석기법을 적용하는 것이 쉽지 않다. 따라서 실험 모드해석(experimental modal analysis)이 점탄성 복합재의 구조해석 기법(D.J. Ewins, 2000)으로 사용되어야 한다.

실험모드해석은 전달함수나 응답의 측정데이터에 포함된 외란이나 오차를 제거하여 대상물의 물리현상을 표현하는 모드 특성치를 결정하기 위한 방법이다.

본 논문에서는 점탄성 복합재의 온도 변화에 따른 모드형상을 비교하기 위해 한쪽면만 구속된 Oberst beam을 사용하여 실험을 수행 하였다. 실험온도를 -15~45℃로 변화시켜가며

각 온도에서의 모드형상을 구하였다. 온도별로 구한 모드형상을 비교하여 점탄성 복합재의 온도변화에 따른 모드형상 변화를 비교하였다.

2. 점탄성 재료의 온도에 의한 특성 변화

온도는 물질의 감쇠에 가장 영향을 많이 미치는 요인으로 평가되고 있다(ASTM, 2004). Fig. 1은 온도에 따른 손실계수와 탄성계수를 나타내고 있다. 첫 번째 영역은 glassy region, 두 번째 영역은 transition region, 세 번째 영역은 rubbery region으로 이 영역이다. 그리고 rubbery region을 벗어나는 영역으로 flow region이 있는데 이 영역은 온도가 올라감에 따라 물질이 녹으면서 점점 부드러워지는 반면에 손실계수는 매우 커지게 된다. 대부분의 점탄성 재료에 있어서 네 번째 영역은 나타나지 않는다. 아래의 그림은 점탄성 물질에 한해서 적용되며 다른 물질의 경우에는 온도에 따른 경향성이 조금은 달라질 수 있다.

교신저자 박한일: 부산광역시 영도구 동삼 2동

051-410-4326 hipark@mail.hhu.ac.kr

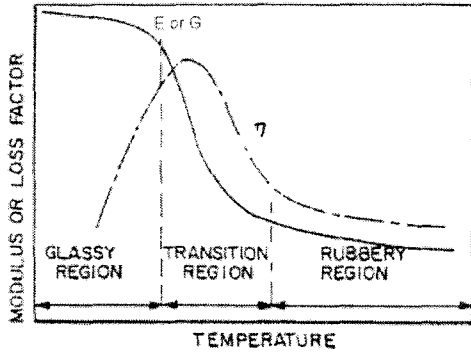


Fig. 1 Variation of Modulus and Material Loss Factor with Temperature

3. 실험적 모드해석

측정을 통하여 실험적으로 구한 전달함수로부터 모드형상을 결정하는 것은 다소 복잡하며 또한 여러 개의 전달함수 측정을 필요로 한다(Daniel J. Inman, 2001). 다자유도계의 운동방정식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = fe^{i\omega t} \quad (1)$$

변위 $x(t) = ue^{i\omega t}$ 를 조화운동으로 가정하여 식 (1)에 대입하고 정리하면 식 (2)를 얻을 수 있다. 이 식에 의해 응답과 입력이 서로 관계된다.

$$u = (K - \omega^2 M + i\omega C)^{-1} f \quad (2)$$

$$\alpha(\omega) = (K - \omega^2 M + i\omega C)^{-1} \quad (3)$$

식 (3)을 리셉턴스 행렬(receptance matrix)이라 한다. 리셉턴스 행렬을 고유모드의 직교성을 이용해 좌표변환을 하면 모드형상벡터를 유도할 수 있다. 먼저 모드강성행렬을 다음과 같이 대각행렬로 나타낸다.

$$\Lambda_K = \text{diag}[\omega_i^2] = P^T M^{-1/2} K M^{-1/2} P \quad (4)$$

$$\Lambda_C = \text{diag}[2\zeta_i \omega_i] = P^T M^{-1/2} C M^{-1/2} P \quad (5)$$

여기서 P 는 행렬 $M^{-1/2} K M^{-1/2}$ 의 정규화 된 고유벡터(normalized eigenvector)로부터 이루어진 행렬이다. 모드감쇠 행렬은 식 (5)와 같이 대각행렬로 나타낼 수 있으며, 이 때 시스템은 비례 감쇠를 갖는 것으로 가정하였다. 식 (4)의 앞뒤에 $M^{1/2} P$ 와 $P^T M^{1/2}$ 을 곱하면 식 (6)이 된다. 마찬가지로 감쇠 행렬은 식 (5)로부터 식 (7)이 된다.

$$K = M^{1/2} P \Lambda_K P^T M^{1/2} \quad (6)$$

$$C = M^{1/2} P \Lambda_C P^T M^{1/2} \quad (7)$$

이 때 $P^T P = I$ 이다. 위의 K, C 에 관한 식을 식 (3)에 대입하면 리셉턴스 행렬은 식 (8)로 된다.

$$\begin{aligned} \alpha(\omega) &= [M^{1/2} P (\Lambda_K - \omega^2 I + i\omega \Lambda_C) P^T M^{1/2}]^{-1} \\ &= [S (\Lambda_K - \omega^2 I + i\omega \Lambda_C) S^T]^{-1} \\ &= [S \text{diag}(\omega_i^2 - \omega^2 + i2\zeta_i \omega_i \omega) S^T]^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $S = M^{1/2} P$ 이다. 괄호 안의 행렬은 대각선행렬의 결합이기 때문에 역시 대각선행렬이 된다. 따라서 식(8)은 식(9)의 형태로 쓸 수 있다.

$$\alpha(\omega) = S^{-T} \text{diag} \left[\frac{1}{\omega_i^2 - \omega^2 + i2\zeta_i \omega_i \omega} \right] S^{-1} \quad (9)$$

식 (9)를 n 개의 행렬의 합으로 다시 쓰면 식 (10)과 같다.

$$\alpha(\omega) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{u_i u_i^T}{(\omega_i^2 - \omega^2) + i(2\zeta_i \omega_i \omega)} \right] \quad (10)$$

벡터 u_i 는 S^{-T} 의 열벡터이다. 또한 이 벡터는 비감쇠 시스템의 모드형상을 나타내며, $u_i u_i^T$ 는 두 개의 $n \times 1$ 모드 형상 벡터의 외적이다. 식 (10)의 리셉턴스 행렬과 시스템 모드형상과의 관계를 이용하여 실험을 통한 측정으로부터 재료의 모드형상을 구할 수 있다.

리셉턴스 행렬 $\alpha(\omega)$ 의 s 번째 행과 r 번째 열의 교점에서의 성분은 점 s 에서의 변위응답 u_s 와 점 r 에서의 가진력 f_r 만 이 작용할 때 전달함수를 나타내며, $\alpha(\omega)$ 의 sr 번째 성분은 식 (11)과 같다.

$$\alpha_{sr}(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{[u_i u_i^T]_{sr}}{\omega_i^2 - \omega^2 + i(2\zeta_i \omega_i \omega)} \quad (11)$$

전달함수 $\alpha_{sr}(\omega)$ 는 모드형상 u_i 와의 관계를 나타낸다. $\alpha_{sr}(\omega)$ 에 대한 이러한 해석은 1자유도 시스템의 전달함수를 일반화한 것이다. 즉, $\alpha(\omega)$ 는 행렬이기 때문에 입출력의 비로써 나타낼 수는 없으나 $\alpha(\omega)$ 의 각 성분은 전달함수이다.

$$\frac{u_s}{f_r} = [\alpha(\omega)]_{sr} = H_{sr}(\omega) \quad (12)$$

식 (12)에서 $H_{sr}(\omega)$ 는 점 r 에서의 입력과 점 s 에서의 응답의 전달함수이다. 식 (11)에 $\omega = \omega_i$ 를 대입하고 크기만을 고려하면 식 (13)이 된다.

$$|\alpha_{sr}(\omega_i)| = \frac{|u_i u_i^T|_{sr}}{|(\omega_i^2 - \omega_r^2) - i2\zeta_i \omega_i \omega_r|} = \frac{|u_i u_i^T|_{sr}}{2\zeta_i \omega_r^2} \quad (13)$$

식 (13)을 다시 정리하면 식 (14)가 된다.

$$|u_i u_i^T|_{sr} = |2\zeta_i \omega_i^2| |H_{sr}(\omega_i)| \quad (14)$$

$|H_{sr}(\omega_i)| = |\alpha_{sr}(\omega_i)|$ 는 점 s 와 r 사이의 주파수 응답함수로서 i 번째 고유진동수에서 주파수응답의 크기만을 나타낸다. 식 (14)는 행렬 $|u_i u_i^T|_{sr}$ 의 한 성분의 크기만을 나타내기 때문에 성분 $|u_i u_i^T|_{sr}$ 의 부호를 알기 위해서는 $H(\omega_i)$ 의 위상을 고려하여야 한다. 응답의 측정점은 s 로 고정하고 가진점 r 를 1부터 n 까지 변화시켜 가며 측정함으로써 행렬 $u_i u_i^T$ 의 임의의 한 행이나 한열의 성분을 모두 구할 수 있게 된다.

4. 실험 및 결과 비교

4.1 시편과 실험장치 소개

실험에 사용된 시편의 형상 및 치수는 기초 빔의 경우 스틸을 사용하고 Root 부분을 고려하여 제작되었다. 판의 두께는 3mm, 폭은 30mm, 그리고 길이는 390mm로 실제 고정되는 부분을 제외한 빔의 길이는 350mm가 된다. 스틸의 한쪽면에 점탄성재를 부착한 Oberst beam을 사용하였으며, 점탄성재의 경우 (주)남양 노비텍회사에서 생산된 제진성 방진 시트를 이용하였다.

본 연구에서는 시편을 외팔보 조건으로 하고 구속부분에 Exciter를 Stinger로 시편과 연결하여 가진을 하고 가속도계 센서를 Fig 2와 같이 1번점에서부터 7번점까지 이동 시켜가며 전달 함수를 측정 하였다.

또한 온도 변화에 따른 값을 얻기 위해서 -30℃에서 45℃까지 온도 제어가 가능한 진동 측정실을 한국해양대학교 해양개발공학부에 구축하였다.

4.2 실험조건

온도 변화에 따른 점탄성 복합재의 특성을 파악하기 위해 -15~45℃로 변화를 주어 실험을 실시하였다. 그리고 온도변화에 따른 시편의 영향을 보다 명확하게 하기 위하여 변화되어진 온도에서 시편을 30분 이상 유지하였고 이때 온도 유지에 따른 오차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이며 주파수의 경우 1.6kHz까지 측정하였다.

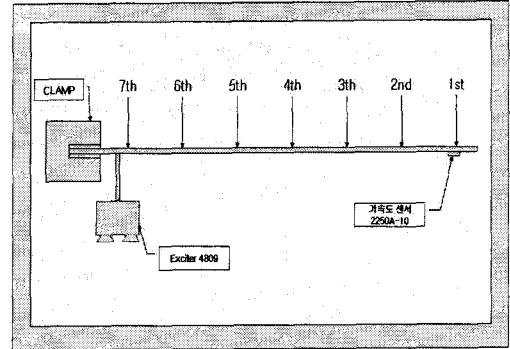


Fig. 2 Experimental Set-Up

4.3 실험 결과

본 논문에서는 1.6kHz 범위 내에서 5개의 모드를 채용하였다. Table 2는 온도별 고유진동수와 감쇠비를 나타내고 있다.

Table 1 Natural frequency and modal damping ratio

온도(℃)	항목	1차	2차	3차	4차	5차
-15	고유진동수	18.75	128.8	365	704	1145
	감쇠비	0.034	0.037	0.048	0.061	0.063
5	고유진동수	18	117.8	329.5	633	1027
	감쇠비	0.025	0.025	0.031	0.032	0.034
25	고유진동수	17.75	113.3	316.3	609.5	995
	감쇠비	0.019	0.01	0.013	0.011	0.011
45	고유진동수	17.75	111.8	312.3	601.8	983.3
	감쇠비	0.017	0.006	0.006	0.006	0.005

Fig 3부터 Fig 7까지는 각 차수별 모드형상을 온도별로 비교 한 것이다.

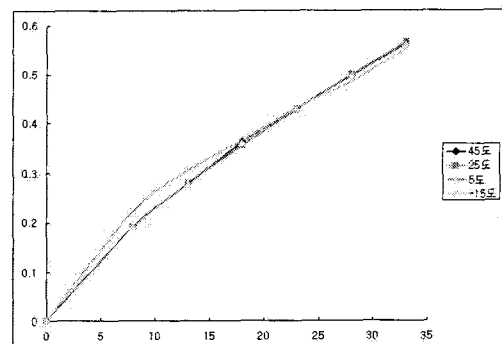


Fig. 3 1st mode shape

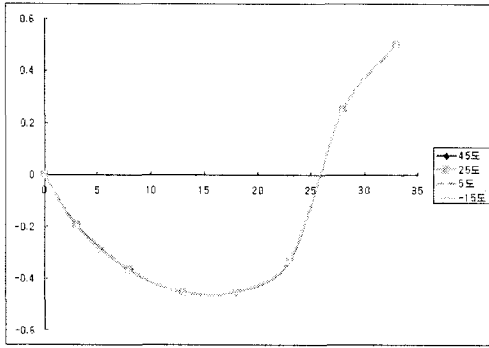


Fig. 4 2nd mode shape

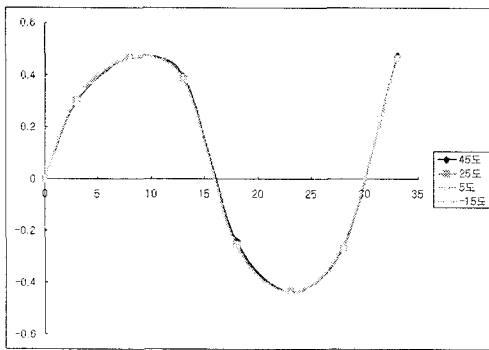


Fig. 5 3th mode shape

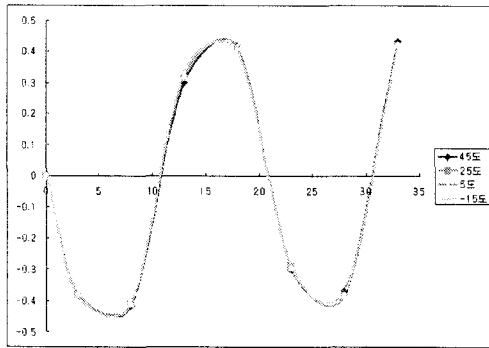


Fig. 6 4th mode shape

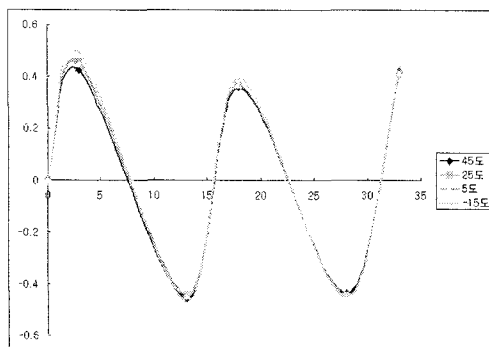


Fig. 7 5th mode shape

실험 결과 온도 변화에 의해 고유진동수와 감쇠비의 변화가 있음을 알 수 있다. 점탄성 복합재의 경우 온도가 증가함

에 따라 고유주파수는 감소하고 손실계수는 고주파에서 보다 저주파에서 큰 값을 가진다. 이러한 특성변화에 의해 모드형상이 변한다.

또한 1차 모드형상과 5차 모드형상에서 온도 차이에 의한 모드형상의 진폭 변화가 나타났다. 구속부분 가까운 곳의 진폭이 -15°C에서 다른 온도의 진폭보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 변화가 생기는 이유는 점탄성 재료의 탄성계수가 낮은 온도에서 올라가기 때문이다(박한일 등, 2005).

기초빔의 탄성계수가 점탄성재의 탄성계수에 비해 매우 크기 때문에 영하의 온도를 제외한 온도에서는 모드형상의 변화가 크게 나타나지 않았다.

5. 결 론

본 논문에서는 점탄성 복합재의 모드형상을 실험모드해석법을 사용하여 구하였다. 점탄성 복합재의 온도 의존적 특성 변화를 확인하기 위하여 실험 온도를 -15~45°C까지 변화시켜가며 1.6kHz범위에서 5개의 모드를 채용하여 모드형상을 구하였다. 이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기초빔의 탄성계수가 점탄성재의 탄성계수에 비해 매우 크기 때문에 영하의 온도를 제외한 온도에서는 모드형상의 변화가 크게 나타나지 않았다.

(2) 영하의 온도에서는 점탄성재의 탄성계수가 급격히 커지기 때문에 모드형상의 진폭이 변하게 된다. 그렇기 때문에 온도가 낮은 지역에 설치되는 점탄성 복합구조물의 경우 온도변화에 의한 모드해석이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 전달함수를 사용하였기 때문에 점탄성 복합재의 비선형성이 반영되지 못했다. 따라서 점탄성 복합재의 비선형성이 반영될 수 있는 비선형 실험모드해석법 개발이 병행 되어야 한다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소(ADD) 지원과제의 일부로 수행된 것을 정리한 것으로, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 박한일, 손재근, 민천홍, 권도영 (2005). "온도변화에 따른 감쇠재의 특성 연구", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp.709-715
- ASTM (2004). "Standard Test Method for Measure Vibration-damping Properties of Materials", E756-04
- Daniel J. Inman (2001). "Engineering Vibration 2th ed", Prentice Hall
- D.J. Ewins (2000). "Modal Testing theory, practice and application 2th ed", Research Studies Press Ltd