

## 복합재의 탄성 및 감쇠계수 측정을 위한 실험연구

박한일<sup>†\*</sup>, 손재근<sup>\*\*</sup>, 민천홍<sup>\*\*</sup>, 배수룡<sup>\*\*\*</sup>

한국해양대 해양개발공학부\*  
한국해양대학교 대학원\*\*, 국방과학연구소\*\*\*

### An Experimental Study on the Measurement of Elastic and Damping Coefficients of a Composite Material

Han-il Park<sup>†\*</sup>, Jae-geon Shon<sup>\*\*</sup>, Cheon-hong Min<sup>\*\*</sup> and Soo-ryong Bae<sup>\*\*\*</sup>

Division of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University\*  
Graduate School of Korea Maritime University\*\*, Agency for Defence Development\*\*\*

#### Abstract

Understanding viscoelastic properties of composite materials is essential for the design and analysis of composite structures. Specially, the loss factor and Young's modulus must be known to develop finite element codes for a composite structure with several damping materials. In this study, an advanced technique for obtaining accurate loss factor and Young's modulus of a composite structure is introduced based on the method of American Society for Testing and Materials (ASTM). The loss factor and Young's modulus of a composite structure are measured for different temperatures by performing the test in a vibration measurement room where temperature can be controllable from 5 to 45 Celsius.

※Keywords: Damping material(감쇠재), Composite beam(복합재), Viscoelasticity(점탄성), Loss factor(손실계수), Young's modulus(탄성계수), Oberst beam(오베르스트 보)

#### 1. 서 론

잠수함이나 유람선 등을 설계하거나 건조할 때는 기계에 의한 소음이나 진동을 줄여 주기 위한 기술이 중요하게 고려되고 있다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 점탄성 재료의 복합재를 적용 하

는 연구가 활발히 진행 되고 있다. 우선적으로 유한요소법에 의한 구조해석 방법이 사용될 수 있으며 ANSYS나 NASTRAN 등과 같이 상용프로그램이 사용될 수 있다. 그러나 복합재료로 구성된 구조체를 해석할 경우 많은 유한요소가 필요하다. 특히, 이들 상용프로그램은 감쇠특성 모델링에 있어서 미비점이 있고 감쇠 구조물의 고주파 해석 어려움이 많아 복합재 해석에 많은 한계가 있다. 따라서 특수 목적용 복합재의 감쇠구조 해석용 전

접수일: 2006년 9월 27일, 승인일: 2006년 12월 11일

† 교신저자, hipark@hhu.ac.kr, 051-410-4326

산 코드 개발이 증가하고 있다.

그러나 감쇠 유한 요소 코드를 개발 시 검증을 위해서는 복합재의 탄성계수(Young's modulus)와 손실계수(Loss factor)를 추정할 필요가 있다. 여러 분야에서 탄성계수와 손실계수를 구하는 실험이 실시되어지고 있으나 실험자의 관심 분야나 정확도에 따라 실험방식이나 적용방법에 있어서 차이를 보인다.

최현과 이정운(1999)은 비공진법을 사용하여 좁은 주파수 영역에서 손실계수를 측정하였다. 비공진법은 손실계수를 측정주파수영역에서 주파수에 대한 연속함수의 형태로 구할 수 있는 장점이 있으나 측정주파수내에 공진점이 존재한다면 실험 결과의 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

김사수 등(1999)은 공진법을 사용하여 손실계수를 측정하였다. 이 실험에서는 가진기와 접촉속 센서를 이용한 실험장치를 사용하였다.

이러한 실험들은 모두 온도특성을 파악하는 실험은 실행되지 않았다. 온도특성을 파악하는 실험은 우창수 등(2002)과 이장명 등(2001)에 의해 수행되었다. 우창수 등(2002)은 방진고무의 동특성을 파악하기 위해서 고무재료에 대한 주파수, 변형률진폭 및 온도변화가 동특성에 미치는 영향을 실험하였다. 비공진법을 사용하였기 때문에 위의 최현과 이정운(1999)과 같은 단점이 있다.

이장명과 이준(2001)등은 비접촉센서와 가진기를 사용하여 실험을 수행하였다. 비접촉 센서를 사용함으로써 부가 질량으로 발생하는 오차를 줄였다.

본 연구에서는 정확한 손실계수와 탄성계수를 얻기 위해 넓은 주파수영역범위에서 측정가능한 공진법을 사용하였다. 0.4그램의 매우 가벼운 가속도계 센서를 사용하고 부가질량의 영향이 없는 충격 망치(impact hammer)를 사용함으로써 실험의 정확도를 올렸다. 온도특성 파악을 위해 최근에 구축된 온도제어 진동측정실에 감쇠 측정 실험장치를 설치하였다. 이를 토대로 복합재의 주파수별 손실계수와 탄성계수 그리고 온도별 특성을 파악 하고자 하였다.

## 2. 이론 적용

### 2.1 점탄성 특성

이상적인 선형 탄성 고체의 경우 응력과 변형률은 비례하나. 점탄성 재료(viscoelastic materials), 즉 감쇠재(damping materials)와 같은 경우에는 응력과 변형률이 시간에 따라 영향을 받는 특성을 가지고 있다. 점탄성 재료의 경우 아래와 같이 ASTM E756-04에서 제시된 식을 통하여 탄성계수와 손실계수를 파악할 수 있다.

#### ▪ Uniform beam

$$E = \frac{12\rho l^4 f_n^2}{H^2 C_n^2}, \quad \eta_n = \frac{\Delta f_n}{f_n} \quad (1)$$

$C_n$  = coefficient for mode n, of clamped-free (uniform) beam

$E$  = Young's modulus of uniform beam

$f_n$  = resonance frequency for mode n of uniform beam

$\Delta f_n$  = the half-power bandwidth of mode n (Hz)

$H$  = thickness of uniform beam (m)

$l$  = length of beam (m)

$n$  = mode number : 1, 2, 3, . . . ,

$\eta_n$  = loss factor of beam material, dimensionless

$\rho$  = density of uniform beam ( $kg/m^3$ )

$C_1 = 0.55959, C_2 = 3.5069, C_3 = 9.8194$

$C_4 = 19.242, C_5 = 31.809$

#### ▪ Oberst beam

$$E_1 = \frac{E}{2T^3} [(a - \beta) + \sqrt{(a - \beta)^2 - 4T^2(1 - a)}] \quad (2)$$

$$\eta_1 = \eta_c \left[ \frac{(1 + MT)(1 + 4MT + 6MT^2 + 4MT^3 + M^2 T^4)}{(MT)(3 + 6T + 4T^2 + 2MT^3 M^2 T^4)} \right]$$

$E_1$  = Young's modulus of damped beam

$c$  = index number : 1, 2, 3, . . . ( $c = n$ )

$D = \rho_1/\rho$ , density ratio

$f_c$  = resonance frequency for mode n of composite beam (Hz)

$\Delta f_c$  = the half-power bandwidth of mode c of composite beam (Hz)

$H_1$  = thickness of damping material (m)

$M = E_1/E$ , Young's modulus ratio

$T = H_1/H$ , thickness ratio

$\alpha = (f_c/f_n)^2(1+DT)$

$\beta = 4+6T+4T^2$

$\eta_c = \Delta f_c/f_c$ , loss factor of composite beam, dimensionless

$\eta_1$  = loss factor of damping material, dimensionless

$\rho_1$  = density of damped beam ( $kg/m^3$ )

위에서 기초보(Uniform beam)는 감쇠재가 부착되지 않은 두께와 폭이 일정한 강재나 알루미늄을 말한다. 한편 오베르스트보(Oberst beam)는 기초보의 한쪽면에 감쇠재를 부착한 것을 말한다. 식(1)로부터 기초보의 탄성계수와 손실계수를 구할 수 있다. 식(2)에서 감쇠재의 손실계수( $\eta_1$ )와 탄성계수( $E_1$ )를 구할 수 있으며 이들은 점탄성 재료, 즉 감쇠재의 특성을 파악할 수 있는 양이다.

### 2.2 환경 요인에 따른 특성

탄성계수와 손실계수는 대부분의 경우 온도와 주파수에 따라 값이 변하게 된다. 따라서 이러한 특성을 사용하여 진동계를 설계하는 경우 그 진동계가 작동하는 환경의 주파수 범위는 물론 온도 범위까지도 고려하여야 한다.

#### 2.2.1 온도에 의한 영향

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 region 이라고 한다. 그리고 rubbery region을 벗어나는 영역으로 flow region이 있는데 이 영역은 온도가 올라감에 따라 물질이 녹으면서 점점 부드러워지는 반면에 손실계수는 매우 커지게 된다.

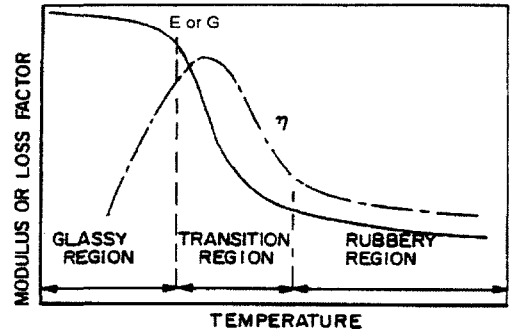


Fig. 1 Variation of elastic modulus and material loss factor with temperature

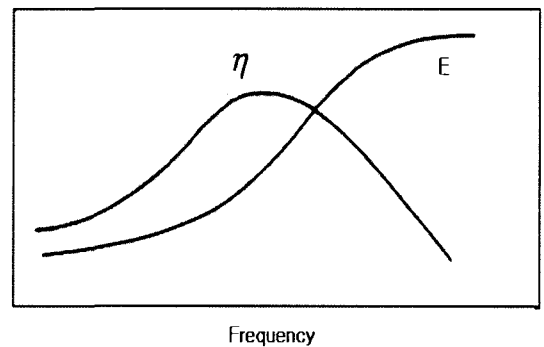


Fig. 2 Variation of elastic modulus and material loss factor with frequency

대부분의 점탄성 재료에 있어서 네 번째 영역은 나타나지 않는다. 이 그림은 점탄성 물질에 한해서 적용되며 다른 물질의 경우에는 온도에 따른 경향성이 조금은 달라질 수 있다.

#### 2.2.2 주파수에 의한 영향

주파수 영역에서 특징적인 현상은 주파수가 증가함에 따라 탄성계수도 증가하는 추세를 보인다. 손실계수의 경우 앞에서 언급한 온도별 특성 파악에서처럼 세 부분으로 나누어서 고려할 수 있으며 주파수를 증가 시킬 때의 특성은 온도를 감소시킬 때의 주파수 특성과 유사한 경향을 보인다.

## 3. 특성 파악 실험

### 3.1 실험 방법

강쇠재의 동적 성질인 탄성계수와 손실계수에 대한 온도별, 주파수별 특성을 파악하기 위한 동적 시험 방법에는 크게 비공진법과 공진법으로 나눌 수 있다. 이때 비공진법의 경우 시편의 동강성을 이용해 전체 주파수에서 특성을 얻는 방법으로 실험의 정밀도가 유지 되지 않을 경우 실험 결과치의 신뢰도가 떨어지는 단점이 있다.

이에 반해 공진법은 시편의 공진 주파수에 국한된다는 단점이 있으나 신뢰도가 높다. 본 연구에서는 실험 시편을 외팔보 조건으로 하고 충격 망치(impact hammer)를 이용하여 공진점에서의 값들을 구하고 그 값들을 이용하여 공진주파수 영역에서의 손실계수와 탄성계수를 구하였다. 본 실험은 ASTM에서 제시되는 사항을 따르고 상황에 맞게 조건을 조절을 하여 실험을 수행하였다.

3.2 시편과 실험장치

접촉식 센서의 사용으로 오는 오류를 줄이기 위해 실험에 사용된 시편은 ASTM의 기준에 비해 크게 제작 되었다. 시편의 형상 및 치수는 Fig. 3과 Table 1에서 보여 지듯이 기초 범의 경우 스틸을 사용하고 연결부를 고려하여 제작되었다. 판의 두께는 3mm, 폭은 30mm, 그리고 길이는 390mm로 실제 고정되는 부분을 제외한 범의 길이는 350mm가 된다. 강쇠재 특성 실험을 위한 시편은 Oberst beam을 사용하였으며, 강쇠재의 경우(주)남양 노비텍회사에서 생산된 제진성 방진 시트를 이용하였다.

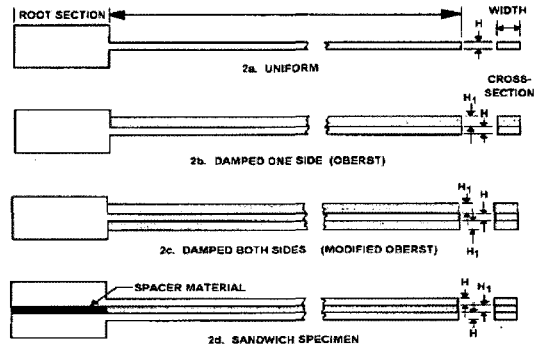
실험장치의 경우 충격 가진을 주기 위한 충격 망치와 가속도계(accelerometer) 그리고 FFT분석을 할 수 있는 분석 장비(multi-analyzer system)를 사용하여 Fig. 4에서 보는 바와 같이 외팔보의 조건에서 실험을 수행하였다. 또한 온도 변화에 따른 값을 얻기 위해서 5°C에서 45°C까지 온도 제어가 가능한 진동 측정실을 구축하였다.

3.3 실험조건

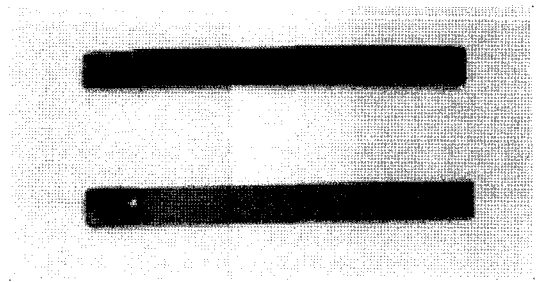
온도 변화에 따른 강쇠재의 특성을 파악하기 위해 5~45°C까지 10°C의 간격으로 변화를 주어 실험을 하였다. 그리고 온도변화에 따른 시편의 영향을 보다 명확하게 하기 위하여 변화되어진 온도

Table 1 Size of Specimens (Unit : mm)

종류	총길이(연결부)	두께	폭
강	390(40)	3	30
강쇠재	350	3	30



(a)



(b)

Fig. 3 Test specimens(ASTM)

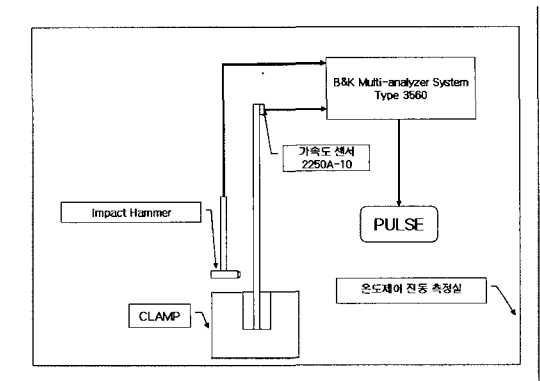


Fig. 4 Experimental set-up

에서 시편을 30분 이상 유지하였다. 이때 온도 오차는  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  이며 주파수의 경우 1.6kHz까지의 값을 측정하였다.

3.4 실험결과

앞에서 언급했듯이 온도 변화에 따른 특성 파악을 위하여 온도제어 장치를 구성하여 실험을 실시하였다. 먼저 Fig. 5, 6에서는 복합재의 특성을 보여준다. 그 중 Fig. 5는 온도변화에 따른 고유주파수변화를 나타낸다. 이 경우 온도가 증가할수록 소량의 감소가 일어나는 것을 알 수 있다. 온도에 따라 감쇠재의 탄성계수는 크게 변화하는데 반해 복합재의 고유주파수가 크게 변화하지 않는 이유는 강재의 탄성계수가 감쇠재의 탄성계수에 비해 100배정도 크기 때문에 복합재의 탄성계수에 감쇠재의 탄성계수가 큰 영향을 주지 못하기 때문이다. 그러나 Fig. 6에서 보듯이 손실계수의 경우 탄성계수보다 온도에 대한 영향을 많이 받고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7, 8에서는 감쇠재의 온도별 특성을 보여주고 있다. Fig. 7은 온도가 증가할수록 감쇠재의 탄성계수가 약간씩 감소함을 보여 주고 있다. Fig. 8은 온도가 증가할수록 감쇠재의 손실계수가 증가함을 보여 준다. 그러나 45 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 다시 감소하는 현상을 보여준다.

알려진 바와 같이 1차 모드의 경우 Oberst beam을 이용한 점탄성재료의 탄성계수 및 손실계

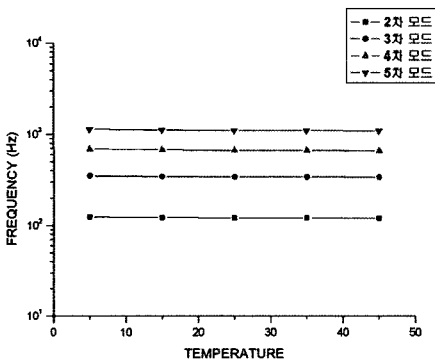


Fig. 5 Frequency versus temperature for various mode (Oberst beam)

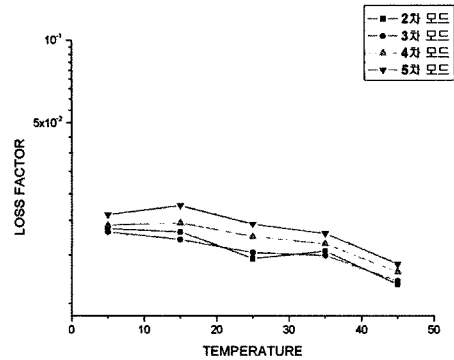


Fig. 6 Loss factor versus temperature for various mode (Oberst beam)

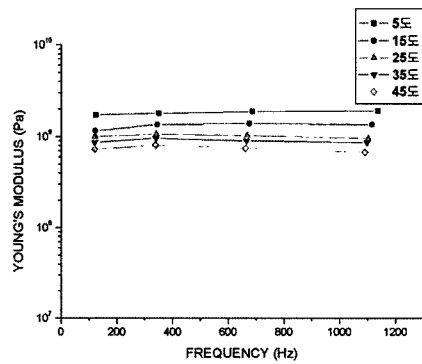


Fig. 7 Young's modulus versus temperature for various mode (Damping material)

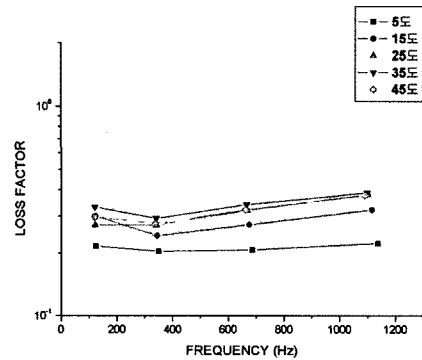


Fig. 8 Loss factor versus temperature for various mode (Damping material)

수 측정 방법이 저주파 영역에서는 정확도가 떨어지기 때문에 이를 측정값으로 사용하기에 어려움이 있었다(Nashif 1985).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 온도 변화에 따른 감쇠재의 특성 변화에 관한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

복합재의 경우 온도가 증가함에 따라 고유주파수는 감소하고 손실계수 역시 감소함을 알 수 있다. 감쇠재의 경우 온도가 증가함에 따라 탄성계수는 작아지며 손실계수의 경우는 높은 온도에서 큰 값을 나타내고 있지만 45℃에서와 같이 고온에서는 다시 감소하는 현상을 보인다.

추후의 연구에서는 주파수에 의존하는 점탄성 손실계수의 측정을 위한 식을 제시하고 실험 결과를 통해 이를 입증하는 연구가 되어야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 국방부가 지정한 수중운동체 특화연구센터(UVRC)의 지원에 의해 수행 되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 김사수, 조대승, 이민우, 1999, “굽힘진동 감쇠를 위한 점탄성 적층보의 최적 설계,” 대한조선학회 논문집, 제 36권, 제 1호, pp. 90-98.
- 우창수, 김완두, 김기세, 권재도, 2002, “실험에 의한 방진고무의 동특성에 관한 연구,” 한국고무학회 Elastomer, 제 37권, 제 3호, pp. 183-191.

- 이장영, 주호민, 이준, 2001, “온도 조건에 따른 제진의 손실계수 및 탄성계수 측정,” 한국소음진동 공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1192-1196.
- 이장영, 이준, 2001, “2층형 제진 강판을 이용한 온도 조건에 따른 제진재의 손실계수 및 탄성계수 측정,” 한국소음진동공학회 논문집, 제 11권, 9호, pp. 391-397.
- 최현, 이정윤, 1999, “점탄성 재료의 손실계수 측정에 관한 연구,” 경기대학교 산업기술종합연구소 논문집, 제 18권, pp. 113-124.
- ASTM, E756-04, 2004, Standard Test Method for Measure Vibration-damping Properties of Materials
- Nashif, A.D., 1985, Vibration Damping, John Wiley & Sons, Inc.



< 박한일 >



< 손재근 >



< 민천홍 >



< 배수룡 >