

## 열적 피로 및 충격이 부가된 Carbon-Epoxy 복합재료의 기계적 특성에 관한 연구

이 동 식 · 박 세 만  
명지대학교 공과대학 기계공학과

### A Study on Variations of mechanical properties of Carbon-epoxy Composites with Thermal Fatigue Cycles or Thermal Shock Cycles

D. S. Lee and S. M. Park

Department of Mechanical Engineering, Myongji University

(1999년 12월 27일 받음, 2000년 4월 8일 최종수정본 받음)

**초** 목 자동차, 항공기 및 기타 산업에서 복합재료의 사용은 증가되어 왔고 활발한 연구가 진행되고 있다. 이러한 복합재료 중의 하나인 carbon-epoxy 복합재료의 열 특성에 관하여 알아보았다. 반복적인 냉각과 가열이 부가된 후 복합재료의 탄성계수의 변화를 관찰하여 봄으로써 복합재료가 가지고 있는 여러 열 특성에 관하여 연구하였다. 이 연구에서  $G_{13}$  값은 약간 감소하기는 하였으나 별다른 변화를 보이지 않았으며 열충격의 경우가 열피로의 경우보다 변화량이 작았다.  $E_1$  값은 가해진 온도와 가열 횟수에 따라하여 조금씩 증가하였고  $E_2$ ,  $G_{23}$  값은 열피로의 경우 처음에는 어느 정도 그 값이 감소하나 가해진 횟수에는 큰 영향을 받지 않았으며 열충격의 경우는 온도에 따라 다른 현상을 보였다.

**Abstract** Applications of composite materials have been in progress noticeably in manufacturing areas of automotive, aircraft and in other industries, resulting in ensuing research activities. Carbon-epoxy, one of major composite materials, is investigated for its thermal characteristics. Upon treatments of the composite material with repeated heatings and coolings variations of its elastic constants are monitored to reveal the thermal nature of the composite material. In this study, generally, changes in elastic constants are observed to occur mostly during the first 10~20 thermal cycles. Values of  $G_{13}$  remain almost unchanged except a minor decrease. However in the observed small changes thermal shocks produce less effect than thermal fatigues. On the other hand, values of  $E_1$  show gradual increases with the number of applied thermal cycles and temperatures. Meanwhile, values of  $E_2$  and  $G_{23}$  decrease to a certain extent in the early stage during the applications of thermal cycling but are not appreciably affected by frequencies of thermal cycles. Also, thermal shocks are observed to induce different effects depending on treatment temperatures.

**Key words** : Composite materials, Elastic constants, Thermal shock, Thermal fatigue

### 1. 서 론

구조재로 사용되는 재료는 금속, 폴리머, 세라믹, 복합재료와 같이 크게 네 가지로 분류할 수 있다. 그 중에서 복합재료는 재료 자체가 가지는 특성으로 인하여 고강도 및 경량화를 요구하는 자동차와 항공기 같은 기계 구조재로 사용되고 있고, 스포츠 용품, 의료 기기 등 여러 분야에서 그 사용이 증가되고 있으며 또한, 생산품의 완결성을 기하기 위해 재료에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 이러한 복합재료의 기계적 성질은 matrix의 성질, 보강재의 성질, 부피분을 그리고 같은 fiber와 matrix와 구성되어 있는 복합재료라 할지라도 fiber 방향의 변화와 laminate geometry의 변화에 따라 변화한다. 그러므로 생산품의 완결성을 기하기 위해 재료의 물성치 측정은 필수적이며 이를 위한 많은 비파괴 검사방법이 연구되어 왔다. 본 실험에서는 재료

의 형상 계수를 알고 있다면 여러 가지 조건에서 재료의 물성치 측정이 용이한 음향공진법을 이용하여 여러 복합 재료 중 carbon-epoxy 복합재료를 상온에서 200℃까지 온도를 변화시키면서 각각의 온도에서 가열과 냉각이 반복되는 열피로를 부가하였을 때 carbon-epoxy 복합재료의 탄성계수 변화를 관찰하여 보았다.

### 2. 기 본 이 론<sup>1,2)</sup>

Transversely isotropic한 복합재료의 경우  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{23}$ ,  $G_{13}$ ,  $\nu$ 와 같은 다섯 개의 상수 값이 존재하게 된다. 이러한 복합재료의 재료의 탄성계수 (Young's Modulus)를 측정하기 위해서는 재료의 굽힘 공진 주파수 ( $f_F$ : Flexural Resonance Frequency)와 비틀림 공진 주파수 ( $f_T$ : Torsional Resonance Frequency)을 측정하여야 한다. 측정된 공진 주파수는 식(2-1) ~ 식(2-4)와 같이 시편의 형상

계수와와의 관계를 통하여 탄성계수를 산출할 수 있다.

2-1. 비틀림 공진주파수 ( $f_T$ )와 탄성계수

비틀림 공진주파수 (Torsional Resonance Frequency)와 횡 탄성계수 사이의 관계<sup>8)</sup>를 1차 모우드이고 길이가  $L$ 인 사각 막대의 경우에 대하여 정리하면 식 (2-1)과 같다.

$$G = \rho (2Lf_T)^2 R \tag{2-1}$$

여기서  $f_T$  : 비틀림 공진 주파수

$L$  : 시편의 길이

$\rho$  : 밀도

$R$  : 형상계수

형상계수  $R$ 은 사각막대의 경우 다음과 같은 방정식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$R = \left[ \frac{1 + \frac{(\alpha)^2}{t}}{4 - 2.521 \frac{t}{\alpha} \left( 1 - \frac{1.991}{e^{\frac{\alpha}{t}} + 1} \right)} \right] \left[ 1 + \frac{0.00851 \alpha^2}{L^2} \right] - 0.06 \left( \frac{\alpha}{L} \right)^2 \left( \frac{\alpha}{t} - 1 \right)^2 \tag{2-2}$$

여기서  $\alpha$  : 시편의 폭

$t$  : 시편의 두께

2-2. 굽힘 공진 주파수 ( $f_F$ )와 탄성계수

굽힘 공진 주파수와 탄성계수와의 관계식<sup>9)</sup>은 크게 두 가지로 구할 수가 있다. Pickette<sup>9)</sup>가 제안한 식과 beam 방정식<sup>5)</sup>에 의한 식으로 나눌 수가 있다. Pickette가 제안한 식은 실험에 사용되는 시편의 두께가 매우 얇을 경우 ( $t/L \approx 0.4$ )에는 오차가 1% 미만으로 매우 정확하나 시편의 길이에 대한 두께의 비가 커질 경우에는 오차가 발생하고 측정되는 공진 주파수도 2차이상의 모우드에서는 적용하기가 힘들다. 따라서 2차이상의 모우드에서는 beam 방정식에 의한 탄성계수 식을 사용하여야 한다. 본 실험에서는 시편의 길이에 대한 두께의 비가 얇은 경우의 시편을 사용하였고, 또한 1차 모우드에서 측정된 공진 주파수만으로도 탄성계수를 측정할수 있었던 관계로 Pickette의 식만을 사용하여 실험을 수행하였다. 굽힘 공진 주파수 (Flexural Resonance Frequency)와 종 탄성계수 사이의 관계를 1차 모우드이고 시편의 길이가  $L$ 인 사각 막대의 경우에 대하여 정리하면 식 (2-3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = 0.94642 \frac{\rho f_F^2 L^4}{t^2} T \tag{2-3}$$

여기서  $f_F$  : 굽힘 공진 주파수

$L$  : 시편의 길이

$\rho$  : 밀도

$T$  : 형상계수

$t$  : 시편의 두께

형상계수  $T$ 는 식 (2.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = 1 + 6.585 (1 + 0.0752\mu + 0.8109\mu^2) \left( \frac{t}{L} \right)^2 - 0.868 \left( \frac{t}{L} \right)^4 - \frac{8.340 (1 + 0.2023\mu + 2.173\mu^2) \left( \frac{t}{L} \right)^4}{1 + 6.338 (1 + 0.1408\mu + 1.536\mu^2) \left( \frac{t}{L} \right)^2} \tag{2-4}$$

3. 실험장치 및 방법

실험장치는 복합재료의 공진 주파수를 측정하는 장치와 복합재료 시편에 열피로를 부가하는 장치로 구성하였다.

3-1. 공진 주파수 측정장치

측정장치<sup>6)</sup>는 재료에 연속적인 진동을 가해주는 가진기 부분 (Driver), 재료의 진동을 수신하기 위한 Pick-up부분, 그리고 재료를 지지해 주기 위한 부분으로 나뉜다. 전체장비의 구성은 그림 1과 같다. 진동을 가해주는 가진기로는 고음용 스피커 (Tweeter Type Speaker)를 사용하였고, 함수발생기 (Function Generator)로는 HP33120A Synthesized Function/Sweep Generator를 사용하였는데 15뿔까지 주파수의 분해능은 0.0001Hz이고, 외부출력은 10V의 출력을 얻을 수 있다. 그러므로 출력을 높이기 위한 증폭기는 사용하지 않았다. Pick-up 장치로는 주파수 범위가 20~20000Hz 범위의 전축바늘 (phonographic needle)을 사용하였고 HP35670A Dynamic Signal Analyzer를 사용하여 신호를 분석하였다. 측정장치에서 가장 중요한 부분은 driver와 pick-up부분이다. Driver로는 고음용 스피커 (Tweeter Type Speaker), 고출력 압전 변환기 (high-power piezoelectric transducer) 등이 이용될 수 있는데 이중 가장 구하기 쉬운 고음용 스피커를 사용하였다. 스피커를 이용할 때 주의해야 할 사항은 스피커마다 사용주파수 범위가 한정되어 있으므로 적당한 주파수 범위의 스피커를 사용하여야 한다. Pick-up장치로 사용된 전축바늘은 바늘 팁의 움직임이 상하의 방향보다는 좌우방향일 때 민감하므로 바늘과 재료의 상대적 방향이 직각이 되도록 구성하여야 한다. 신호의 S/N 비를 높이기 위하여 SR-530 Lock-in amplifier를 사용하였다. 실험장치의 정확도를 측정하기 위해서는 NIST에 있는 reference specimen (Flexural Freq. 2001.30Hz, Torsional Freq. 11073.05Hz)의 가지고 측정하여야 하나 실제적으로 구하기가 난이한 관계로 공기중에서 산화가 거의 일어나지 않는 알루미늄을 표준시편으로 제작하여 1주일 단위로 실험장치

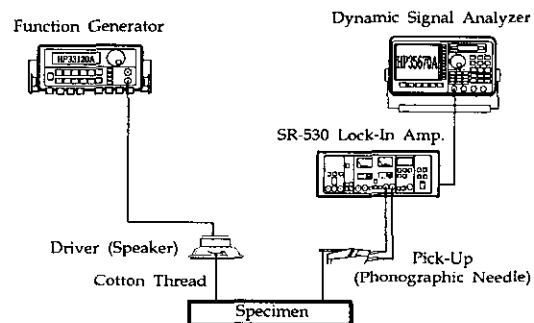


Fig. 1. General block diagram of instrumentation

를 보정하였다. 시편을 실로 매달 경우 굽힘 진동의 경우에는 두 실이 평행하도록 매어야 하며 비틀림 진동의 경우 두 실이 서로 대각방향으로 매달아야 보다 정확한 공진 주파수 측정을 할 수 있다. 굽힘 진동이 비틀림 진동보다는 낮은 주파수 대에서 공진이 일어나고 각각의 공진 주파수는 모두 1차 모드의 공진 주파수를 채택하였다. 일반적으로 1차 모드의 경우가 진폭의 크기가 가장 크므로 1차 모드의 주파수를 채택하여도 큰 무리가 없다. 그러나 보다 정확한 평가를 위해서는 2차, 3차... 이상의 고차모드에서의 공진 주파수를 측정하여 1차 모드의 경우와 비교하는 작업이 필요하다.

3-2. 열피로 및 열충격 부가 실험장치

복합재료에 반복되는 가열과 냉각을 부가하였을 때 반복되는 열이 복합재료의 물성치에 주는 영향을 관찰하기 위하여 서브 모터와 캠을 이용하여 장비를 구성하였다. 서브 모터에 기어박스과 컨트롤러를 장치하여 시편의 가열 시간을 1/2 사이클, 냉각되는 시간을 1/2사이클로 하여 캠을 설계하였고 1사이클은 7분에서 75분까지 조정이 가능하게 하였다. 가열 장치는 500℃까지 온도를 올릴 수 있고 정확도를 높이기 위하여 K-type 열전대를 설치하여 ±0.5℃의 오차 범위에서 사용할 수 있게 하였다. 냉각은 열피로의 경우 상온(25℃)에서 서냉하였고 시편이 상온과 같아지면 재가열을 실시하였으며 열충격의 경우 5℃의 물로서 급냉을 실시하였다. 이 실험에서는 1 사이클을 10분으로하여 상온에서 200℃까지 온도를 50℃씩 변화시키면서 각각의 온도에 대하여 10사이클씩 5회 반복하여 열을 가하여 10사이클마다 열이 복합재료의 공진 주파수와 탄성계수에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

3-3. 실험시편

실험에 사용된 시편은 Tetrahedron사의 Hot Press를 사용하여 5°F/min heating, 350°F, 2hr, 5°F/min cooling, pressure 85 psi 경화조건으로 Hexcel사의 DMS 2224 Class1, Type T, Grade 2인 단일 방향 carbon-epoxy prepreg을 20장 적층하여  $V_f=0.55$ 로 제작하였다. Carbon fiber는 Hercules Carbon Fiber Type AS4를 사용하였고 epoxy는 F584 Resin을 사용하였다. 적층 제작된 복합재료 판재를 보강재의 방향과 같은 길이 방향과 보강재의 방향(0°)과 수직인 방향(90°)으로 다이아몬드 cutter를 사용하여 각각 7개씩 절단한 후 굽힘 공진 주파수와 비틀림 공진 주파수를 측정하여 종 탄성계수와 횡 탄성계수 값을 구하였다.

4. 결과 및 검토

이 실험에서는 지속적으로 증가하는 열이 복합재료에 가해졌을 때 재료의 탄성계수가 60℃까지는 급격히 감소하다가 그 이후에는 거의 변하지 않는 것과는 다르게 가해지는 열의 온도와 횡수에 따라 각 탄성계수의 변화가 다를 수 있다. 그림 2~17은 각각의 온도에서의 탄성계수를 나타낸 그래프이며 ▲표시는 열충격의 경우를 ■표시는 열피로의 경우를 나타내고 있다.

Carbon-epoxy 복합재료에 열충격 및 열피로를 가했을

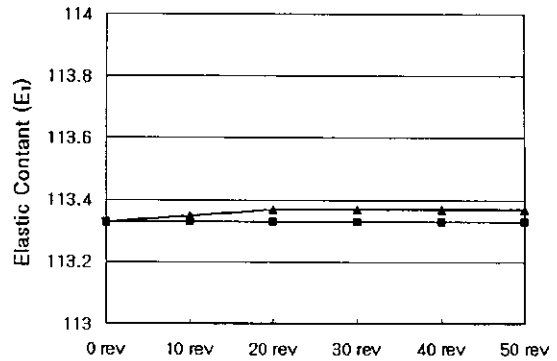


Fig. 2. Variation of  $E_1$  on 50°C

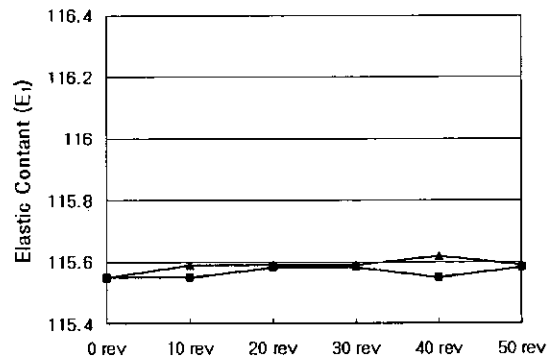


Fig. 3. Variation of  $E_1$  on 100°C

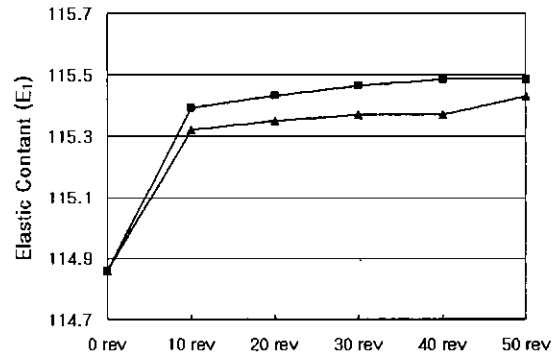


Fig. 4. Variation of  $E_1$  on 150°C

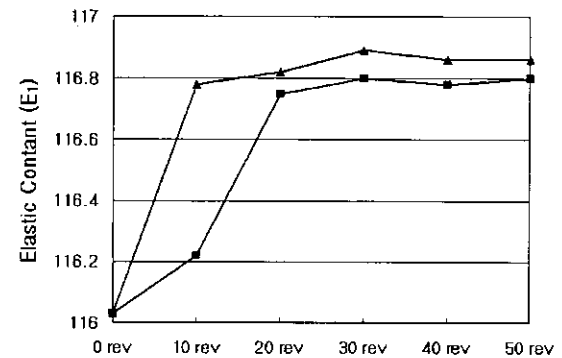


Fig. 5. Variation of  $E_1$  on 200°C

때 상온에서 75℃까지는 탄성계수 변화가 거의 없었으며 처음 10~20회 사이에 가장 큰 변화를 보였다.  $E_1$ 값은 그

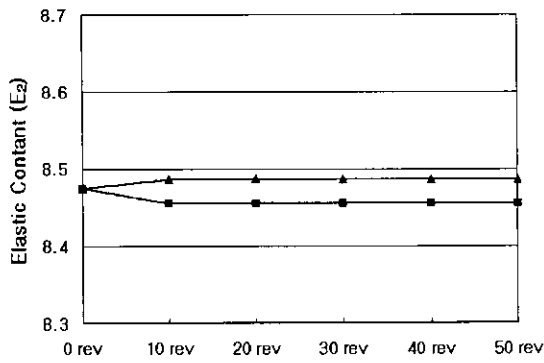


Fig. 6. Variation of  $E_2$  on 50°C

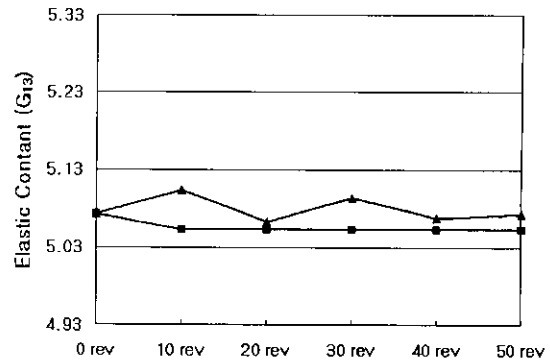


Fig. 10. Variation of  $G_{13}$  on 50°C

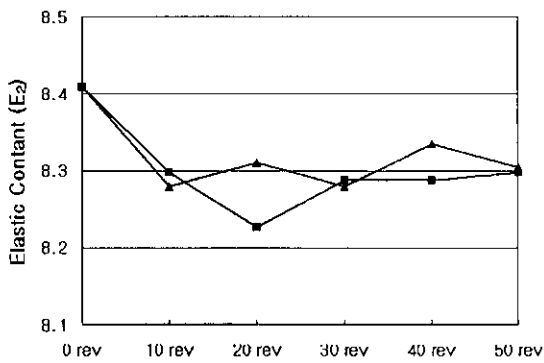


Fig. 7. Variation of  $E_2$  on 100°C

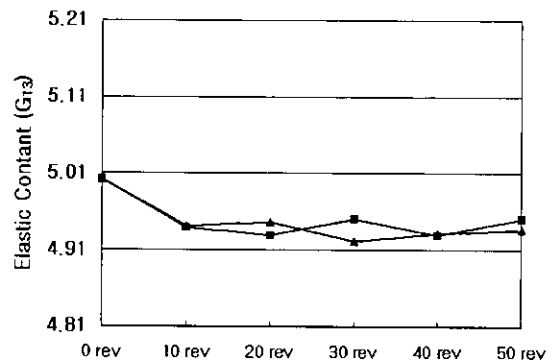


Fig. 11. Variation of  $G_{13}$  on 100°C

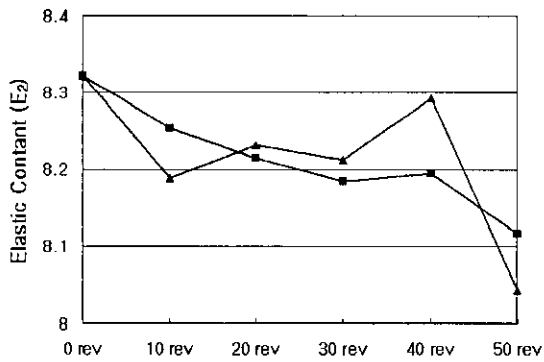


Fig. 8. Variation of  $E_2$  on 150°C

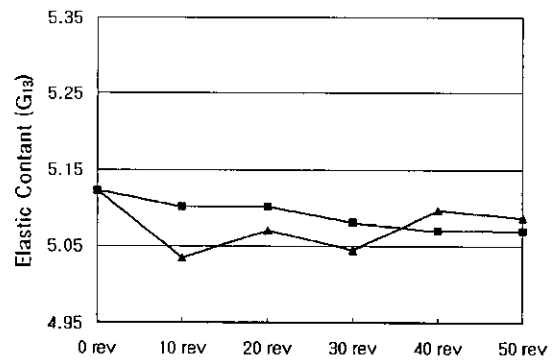


Fig. 12. Variation of  $G_{13}$  on 150°C

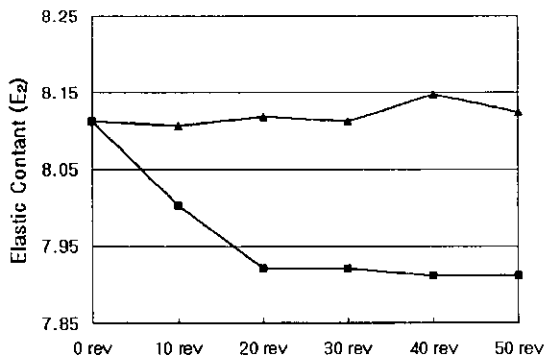


Fig. 9. Variation of  $E_2$  on 200°C

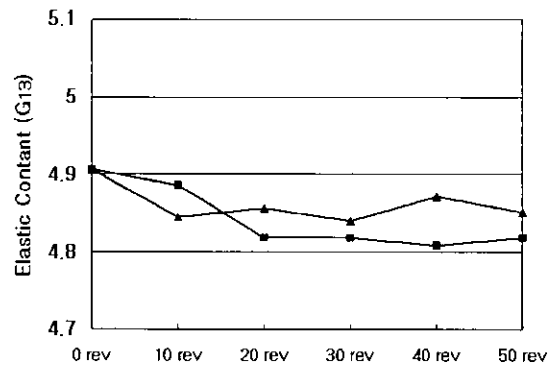


Fig. 13. Variation of  $G_{13}$  on 200°C

림 2~5에서 보는 것과 같이 가열 온도가 증가함에 따라서 그리고 가열 횟수에 따라서 그 값이 계속 증가하였으며 두

경우 다 비슷한 경향을 보였으나 열충격의 경우가 열피로의 경우보다 처음 10회에 대한 변화량이 많았다. 그러나 전체

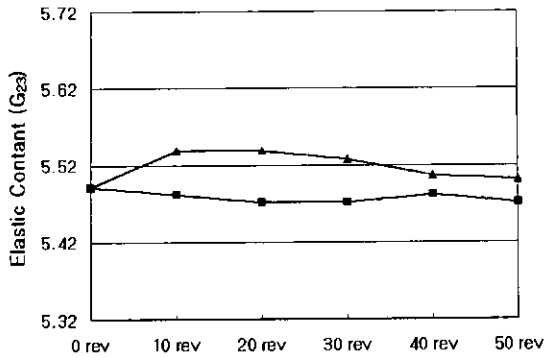


Fig. 14. Variation of  $G_{23}$  on 50°C

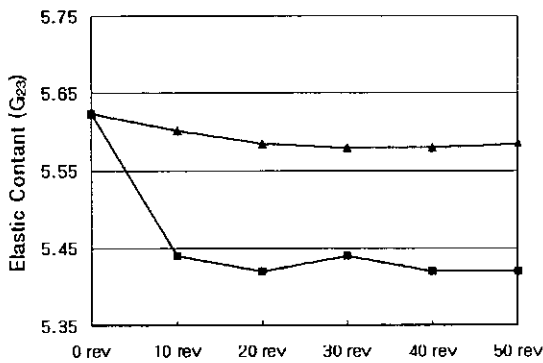


Fig. 15. Variation of  $G_{23}$  on 100°C

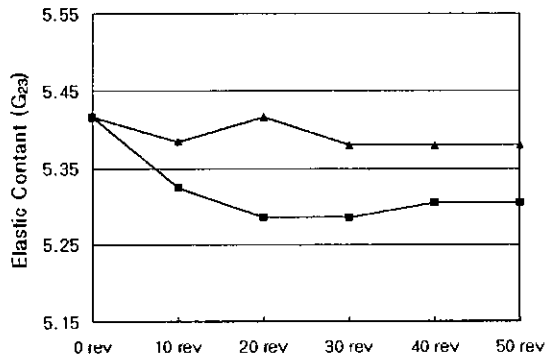


Fig. 16. Variation of  $G_{23}$  on 150°C

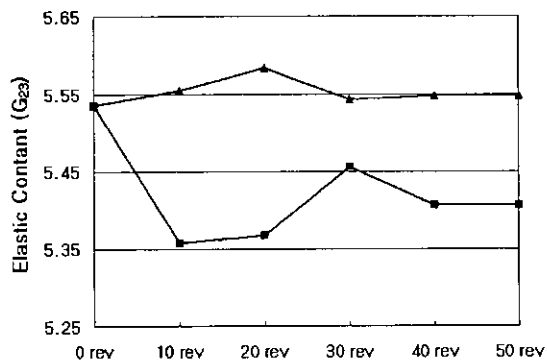


Fig. 17. Variation of  $G_{23}$  on 200°C

적인 증가량은 50회에 1% 이하로 미소하였다.  $E_2$ ,  $G_{23}$ 값은 거의 같은 형태의 변화를 보이는데 50°C에서는 처음 10회

에 열충격의 경우 탄성계수의 증가가 열피로의 경우는 감소가 발생한다. 100~150°C에서는 두 경우 다 감소하지만 열충격의 경우가 변화량이 적게 나타난다. 200°C에서는 열충격의 경우는 거의 변화가 없으나 약간의 증가를 나타내고 열피로의 경우는 많은 탄성계수의 감소가 발생하였다. 그리고  $G_{13}$ 는 가해지는 열에 대하여 전체적으로는 감소 현상을 보였으나 열충격의 경우에는 온도에 따라서 처음 10회의 탄성계수 감소가 증가하는 것 이외에는 규칙적인 현상을 보이지는 않았다.

이 실험에서 carbon-epoxy 복합재료는 열피로에서는 탄성계수가 증가 혹은 감소 하더라도 그 값이 점차 안정되는 현상을 보이거나 그 변화의 값이 크고 열충격의 경우는 변화가 일찍부터 발생하며 그 상태가 매우 불안정지만 변화의 폭은 열피로의 경우 보다 작음을 알 수 있다. 일반적으로 carbon-epoxy 복합재료는 기지재료 사용되는 epoxy의 영향으로 인하여 열에 약한 현상을 보인다. 이 실험의 경우에도 반복되는 열이 재료에 부가되었을 때에는 기지 재료로 사용되는 epoxy의 영향으로 인하여 실험의 결과와 같은 탄성계수의 변화가 발생하였다. 기지재료로 사용되는 epoxy는 120°C~150°C사이에서 점도의 변화 및 경화가 일어나는데 이러한 이유로 열경화성 수지인 epoxy의 물성 변화가 가장 크게 발생하는 처음 10~20회에 탄성계수의 변화가 가장 심하였으며 일단 경화가 발생한 이후에는 탄성계수의 값이 크게 변하지는 않았다. Epoxy의 영향이 미치는  $E_2$ ,  $G_{23}$ 값의 변화는 50°C에서는 크게 변화를 보이지 않으나 열충격의 경우 epoxy의 점도 증가에 의한 탄성계수의 증가가 열피로의 경우 epoxy의 연화에 의한 탄성계수의 감소가 관찰된다. 하지만 epoxy의 물성치 변화가 발생하기 시작하는 100°C를 넘어가면서 두 경우 다 탄성계수 값의 감소가 발생한다. 이것은 50°C의 경우와는 달리 epoxy의 경화와 점도 변화가 탄성계수에 영향을 준 것으로 생각된다. 그러나 보강재료로 쓰이는 carbon이 주로 영향을 미치는  $E_1$ 의 경우는 50°C~200°C에서 carbon의 물성이 큰 변화를 보이지 않으나 epoxy의 경화시 carbon과의 결합도가 높아져 증가하는 것으로 생각된다.

### 5. 결 론

공진법은 재료의 고유진동수와 동일한 진동을 외부에서 가할 때 일어나는 공진 현상을 이용하여 재료의 탄성계수를 측정하는 방법이다. 본 연구에서는 이러한 공진법을 이용하여 transversely isotropic한 복합재료의 13평면과 23평면의 flexural, torsional resonance frequency를 측정하여  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{13}(=G_{12})$ ,  $G_{23}$ 값을 구하였다. 또한 반복적으로 가해지는 열에 따른 공진주파수와 탄성계수의 변화를 살펴보았다. 이 연구에서 반복적인 열이 가하여 졌을 때 탄성계수의 값은 처음 10~20회에 크게 발생하고 그 이후에는 소량의 변화만을 보인다.  $G_{13}$ 값은 약간 감소하기는 하였으나 별다른 변화를 보이지 않았으며 열충격의 경우가 열피로의 경우보다 변화량이 작았다.  $E_1$ 값은 가해진 온도와 가열 횟수에 따라하여 조금씩 증가하였고  $E_2$ ,  $G_{23}$ 값은 열피로의 경

우 처음에는 어느 정도 그 값이 감소하나 가해진 횟수에는 큰 영향을 받지 않았으며 열충격의 경우는 온도에 따라 다른 현상을 보였다. 이런 특성은 기지재료로 쓰이는 epoxy의 점도 변화 및 경화 영향으로 보인다. 이후 이러한 변화가 재료 내부에 미치는 영향을 알아보기 위하여 감쇠계수등의 다른 물성치 관찰을 해야만 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. G.R. Cowper, The Shear Coefficient in Timoshenko's Beam Theory, *J. Appl. Mech.* 33, 335-340 (1966).
2. G.R. Cowper, A Study of errors due to shear and rotary inertia in the determination of Young's modulus by flexural vibrations, *British J. Appl. Phys.*, 1, 1766-1767, (1968).
3. G. Pickett, Equations for computing elastic constants from flexural and torsional resonant frequencies of vibration of prisms and cylinders, *Proceedings of the American Society for Testing Materials* 45, 846-865. (1945).
4. I.G. Ritchie, Improved Resonant Bar Techniques For The Measurement Of Dynamic Elastic Moduli And A Test Of the Timoshenko Beam Theory. *J. Sound and Vibration*, 31 (4), 453-468 (1973).
5. Singiresu S. Rao., *Mechanical Vibrations*, Addison-Wesley, 1995.
6. S. Spinner and R.C. Valore, Jr., Comparison of Theoretical and Empirical Relations Between the Shear Modulus and Torsional Resonance Frequencies for Bars of Rectangular Cross Section, *Journal of Research of the National Bureau of Standards Vol. 60* (5), 459-464 (1958).
7. S. Spinner, T.W. Reichard, and W.E. Tefft, A Comparison of Experimental and Theoretical Relations Between Young's Modulus and the Flexural and Longitudinal Resonance Frequencies of Uniform Bars, *Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry*, Vol. 644 (2), 147-155 (1960).
8. S. Spinner and W.E. Tefft, A Method for Determining Mechanical Resonance Frequency and for Calculating Elastic Modulus from These Frequencies, *Proceedings of ASTM*. 45, 1221-1238 (1945)
9. T.C. Huang, The Effects of Rotary Inertia and of a Shear Deformation on the Frequency and normal mode equations of uniform Beams with simple end conditions., *J. Appl. Mech* 28. 579-584 (1961).
10. Timoshenko, S.P. *Vibration Problem in Engineering*, Van Nostrand, New York, 3rd. 1955.
11. T.J. Dudek, Young's and Shear Moduli of Unidirectional Composites by a Resonant Beam Method, *J. Composite Materials*, Vol. 4, 232 (1970).
12. W. Lee, *Characterization of Composites by Internal Friction and Elastic Modulus Measurements*, Michigan state University, (1988).
13. 이승석, 안봉영, 김영길, 김영실, 초음파 에코 주침법과 공진법을 이용한 소재의 탄성계수 측정기술 개발, KRIS-94-029-IR, (1994).