

탄소섬유 복합재료의 열사이클에 의한 물성치 변화에 관한 연구

최순권* · 박세만** · 박명균***

A study for multi thermal cycle effect on mechanical property change in carbon epoxy composite

S.K. Choi, S.M. Bahk and M.K. Park

Key Word: Thermal cycle, Dynamic modulus, Carbon fiber composite, resonance method

Abstract

Composite materials have been increasingly used in automotive and aircraft industries, naturally leading to active researches on the materials. The carbon-epoxy composite is selected to study its thermal characteristics. During multiple thermal cycles composed of repeated cooling and heating variations of elastic constants are investigated to understand thermal effects on the carbon-epoxy composite. In this investigation longitudinal resonance method and flexural resonance method was used to characterize. The values of E_1 show small amount of increases depending on number of cycles of the thermal fatigue processes whereas values of G_{13} do not indicate noticeable changes. Also, in cases of E_2 and G_{23} their values decrease to a certain extend in initial stages after applications of thermal fatigue processes. However, the number of cycles of the applied thermal fatigue processes does not seem to affect their values.

1. 서론

구조물의 재료는 금속, 폴리머, 세라믹, 복합재료와 같이 크게 네 가지로 분류할 수 있다. 그 중에서도 복합재료는 재료 자체가 가지는 특성으로 인하여 고강도 및 경량화를 요구하는 자동차와 항공기의 구조재료로 널리 사용되고 있다. 특히 최근에는 스포츠 용품, 의료 기기등 여러 분야에까지 그 사용이 증가되고 있다. 특히 구조재료 설계시 재료에 대한 정확한 기계적 물성치의 이해와 측정기법은 매우 중요하다고 할 수 있다. 일반적으로 복합재료의 기계적 성

질은 기지재료의 성질, 보강재의 성질, 부피분율 그리고 동일한 보강재료와 기지재료로 구성되어 있는 복합재료라 할지라도 fiber 방향의 변화와 적층 형상 (laminate geometry)의 변화에 따라 변화한다. 본 연구에서는 재료의 형상 계수를 알고 있을 때 재료를 파괴하지 않고 동일재료로 여러 실험을 동시에 할 수 있는 음향공진법을 이용하여 반복 열 사이클 상태 하에서의 carbon-epoxy 복합재료의 횡탄성, 종탄성계수의 변화를 관찰하여 보았다.

2. 기본 이론

Transversely Isotropic한 재료의 경우 E_1 , E_2 , G_{12} , G_{23} , ν_{23} 와 같이 5개의 상수 값이 존재한다. 이 상수들 중에서 G 값은 대부분의 실험에서 12평

* 명지대학교 기계공학과 대학원

** 명지대학교 기계공학과

*** 명지대학교 기계공학과

면에 대해 측정이 용이하지 않으므로 본 연구에서는 23평면(Fig. 3)에서 E_1, G_{23} 값을 13평면(Fig. 4)에서 $E_2, G_{13}(=G_{12})$ 값을 공진법을 이용하여 구하였다. 공진법으로 재료의 횡, 종 탄성계수(Young's and Shear Modulus)를 측정하기 위해서는 재료의 휨 공진주파수(f_F : Flexural Vibration Resonant Frequency)와 비틀림 공진주파수(f_T : Torsional Vibration Resonant Frequency)의 측정이 필요하다. 일반적으로 휨 공진주파수(f_F : Flexural Vibration Resonant Frequency)를 사용할 경우는 E 값을 보다 용이하게 구할 수 있고 비틀림 공진주파수(f_T : Torsional Vibration Resonant Frequency) 경우 G 값을 구할 수가 있다.

2-1. 휨 공진주파수(f_F)

휨 공진주파수 (f_F : Flexural Vibrational Resonance Frequency)와 Young's Modulus 사이의 관계를 살펴보면 굽힘 진동이 비틀림 진동보다는 낮은 주파수대에서 공진이 일어남을 알 수 있다. 각각의 실험에서 공진 주파수는 모두 1차 모드의 공진 주파수를 채택하였다. 그 이유는 일반적으로 1차 모드의 경우 진폭의 크기가 가장 크므로 1차 모드의 주파수를 채택하는 것이 측정에 용이하다. 그러나 보다 정확한 평가를 위해서는 2차, 3차... 이상의 고차모드에서의 공진 주파수를 측정하여 1차 모드의 경우와 비교하는 작업이 필요하다. 보의 진동방정식을 free-free vibration의 경우 1차 모드에서 길이가 L 인 직사각막대의 경우에 적용하여 정리하면 식(1)와 같이 표시할 수 있다.

$$W_F = 2\pi f_F = (4.7230041)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \quad \dots (1)$$

2-2. 비틀림 공진주파수(f_T)

비틀림 공진주파수(Torsional Resonant Frequency)와 종탄성계수 (Shear Modulus)사이의 관계는 식 (2)과 같다.

$$W_T = 2\pi f_T \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{GK}{\rho J}} \quad \dots (2)$$

$$G = \frac{4 f_T^2 \rho J L^2}{K}$$

식에서 ρ 는 밀도이고 n 은 상수로서 기본모드에 대하여 1이며, 높은 차수의 모드에 대하여 2, 3, ...으로 증가한다. K 는 단면의 형상계수로서

$$K = \frac{ab^3}{16} \left[\frac{16}{3} - 3.36 \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b^4}{12a^4} \right) \right] \quad \text{이다.}$$

3. 실험 방법

3-1. 공진주파수 측정을 위한 실험장치

측정장치는 재료에 진동을 가해주는 가진기 부분(Driver), 재료의 진동을 수신하기 위한 Pick-up 부분, 그리고 재료를 지지해 주기 위한 부분으로 나뉜다. 전체장비의 구성은 Fig. 1과 같다. 진동을 가해주는 가진기로는 Tweeter Type Speaker를 사용하였고, Function Generator로는 HP33120A Synthesized Function/Sweep Generator를 사용하였다. Pick-up 장치로는 주파수 범위가 20~20000 Hz 범위의 Phonographic needle를 사용하였고 HP35670A Dynamic Signal Analyzer를 사용하여

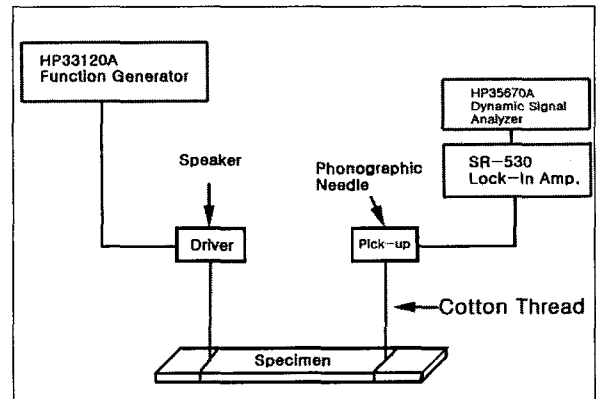


Fig. 1 General Block Diagram of Instrumentation

신호를 분석하였다. 신호의 S/N 비를 높이기 위하여 SR-530 록인 증폭기(Lock-in amplifier)를 사용하였다. 자유-자유(free-free vibration)의 경우 재료를 지지하는 방법으로는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 하나는 재료의 nodal point 아래에 knife edge나 foam rubber를 놓는 방법과 둘째로는 실로 매다는 방법이 있는데 이 실험에서는 실로 매다는

방법을 사용하였다. 재료를 실에 매달 경우에는 실의 매듭이 nodal point를 벗어나도록 하여야 한다.

3-2. 열 사이클을 가하기 위한 실험장치

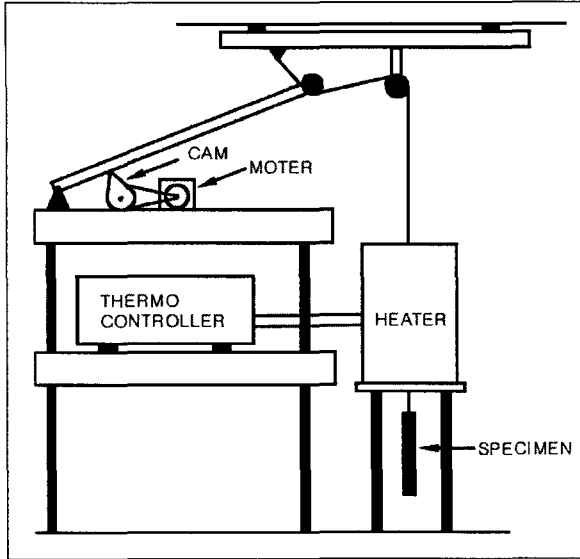


Fig 2 General Block Diagram of Thermal Fatigue Cyclings

각 시편을 상온(25℃)에서 225℃까지 25℃씩 나누어 각각의 일정 온도에서의 가열과 일반 대기중(25℃)에서의 서냉을 반복하기 위하여 Fig. 2와 같은 서브 모터와 캠을 이용한 실험 장치를 구성하였다. 시편의 냉각시간이 길므로 서브 모터에 기어 박스와 컨트롤러를 장치하여 시편이 가열 시간을 약 1/2 사이클, 냉각되는 시간을 약 1/2사이클로 하여 캠을 설계하였고 1사이클은 9분에서 75분까지 조정이 가능하게 하였다. 본 실험에서는 한 cycle을 9분에 맞추어 각 시편당 10회씩 7회, 총 70회의 가열과 서냉을 실시하였다. 가열 장치는 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 오차 범위에서 사용되었다.

3-3. 실험시편

실험에 사용된 시편은 Tetrahedron사의 Hot Press를 사용하여 5F/min heating, 350F, 2hr, 5F/min Cooling, Pressure 85 psi 경화조건으로 Hexcel사의 DMS 2224 Class1, Type T, Grade 2 인 단일 방향 Carbon-Epoxy prepreg를 $V_f=0.55$ 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 9개씩 절단한 후 급힘 공진 주파수와 비틀림 공진 주파수를 측정하여 종 탄성계수와 횡 탄성계수 값을 구하였다. Table 1과 Table 2는 실험에 사용된 시편의 규격과 밀도를 나타낸 표이다.

Table 1. Standard dimension of specimen

No.	Peak Temp.	Length (mm)	Width (mm)	Thick-ness(mm)	Density (g/cm ³)
0-1	50℃	142.7	15.69	2.19	1.5092
0-2	75℃	143.18	15.68	2.17	1.5190
0-3	100℃	142.02	15.42	2.15	1.5398
0-4	125℃	141.17	15.7	2.21	1.5305
0-5	150℃	141.57	15.62	2.17	1.5213
0-6	175℃	142.17	15.67	2.2	1.4996
0-7	200℃	142.13	15.67	2.17	1.5415
0-8	225℃	142.42	15.69	2.22	1.5320

Table 2. Standard dimension of specimen

No.	Peak Temp.	Length (mm)	Width (mm)	Thick-ness(mm)	Density (g/cm ³)
90-1	50℃	128.40	15.92	2.16	1.5288
90-2	75℃	128.53	15.79	2.19	1.5075
90-3	100℃	128.06	15.55	2.11	1.5112
90-4	125℃	128.82	15.61	2.12	1.5247
90-5	150℃	128.42	15.83	2.14	1.5279
90-6	175℃	128.36	15.87	2.15	1.5412
90-7	200℃	128.34	15.81	2.13	1.5502
90-8	225℃	127.86	15.85	2.18	1.5279

4. 결과 및 고찰

실험장치는 E 값을 알고 있는 재료중에서 공기중에서 변화가 거의 없는 Al_2O_3 를 사용하여 주파수를 구하고 그 주파수를 기준으로 하여 실험장치를 Calibration 하였다. Fig. 2과 같은 실험장비로 주어진 조건의 온도에서 재료에 10 회의 열 사이클을 가한 후 상온에서 Fig 1.의 실험 장비로 각 시편당 5회씩 실험을 하여 시편의 휨(Flexural) 및 비틀림 공진 주파수(Torsional Resonant Frequency)를 측정하였다. Fig. 3와 같은 시편으로

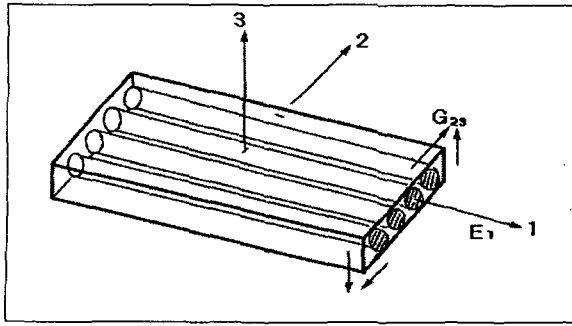


Fig. 3 Lamina Coordinate Of Material Properties(E_1, G_{23})

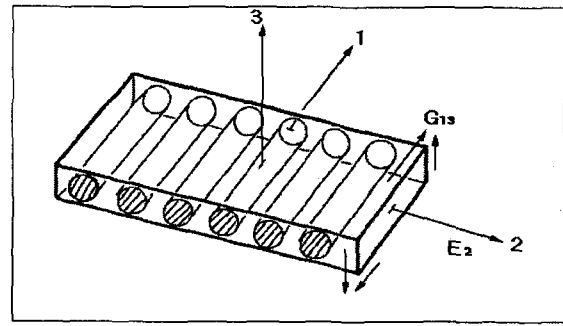


Fig. 4 Lamina Coordinate Of Material Properties(E_2, G_{13})

E_1, G_{23} 값에 해당하는 공진주파수를 측정하고, Fig. 4와 같은 시편으로 E_2, G_{13} 값에 해당하는 공진주파수를 측정하여 식(1)과 식(2)에 측정된 공진주파수를 대입하여 탄성계수를 구하였다. Table 3은 0° 방향으로 절단한 시편의 탄성계수 값의 변화를 나타낸 표이다.

90° 방향으로 절단한 시편의 E_2, G_{13} 값에 해당하는 탄성계수의 변화는 Table 4에 나타내었다.

이 실험에서는 지속적으로 증가하는 열이 복합재료에 가해졌을 때 재료의 탄성계수가 60°C 까지는 급격히 감소하다가 그 이후에는 거의 변하지 않는 것과는 다르게 부가되는 열사이클의 최고온도와 횟수에 따라 각 탄성계수의 변화가 다를 수 있다.

표에서 알 수 있듯이 상온에서 열 사이클 최고온도가 75°C 까지의 경우에는 열 사이클에 의한 탄성계수 변화가 거의 없었다. 그러나 E_2, G_{23} 값의

경우 열 사이클 최고온도 75°C 부터 탄성계수의 변화가 일어나기 시작하였고 125°C 까지는 그 변화량이 증가하여 125°C 에 변화량이 최대가 되었다. 그러나 그를 지나면서 그 변화 폭이 감소하였다. 또한 이 경우 처음 10회의 반복 열사이클을 가했을 때 변화가 일어나고 그 이후의 반복 열 사이클에는 크게 영향을 받지 않았다. E_1 값과 G_{13} 값은 열 사이클의 최고온도가 증가함에 따라서 그리고 열 사이클의 횟수에 따라서 그 값이 계속 증가하였으나 횟수에 따라서 증가하는 양은 70회에 1% 이하로 미소하였다. 예상한대로 100회 미만의 반복 열 사이클 횟수에서는 영향을 받지 않지만 상당횟수의 열 사이클이 적용되면 영향을 받으리라 사료되며 이에 대한 연구는 진행 중에 있다. 일반적으로 Carbon-epoxy 복합재료는 기지재료 사용되는 epoxy의 영향으로 인하여 열에 약한 현상을 보인다. 이 실험의 경우에도 반복되는 열 사이클이 부가되었을 때에는 기지 재료로 사용되는 epoxy의

Table 3. Variation of moduli (E_1, G_{23}) (unit : GPa)

No.	Peak temperature in thermal cycle	0 rev		10 rev		20 rev		30 rev		40 rev		50 rev		60 rev		70 rev	
		E_1	G_{23}	E_1	G_{23}	E_1	G_{23}	E_1	G_{23}	E_1	G_{23}	E_1	G_{23}	E_1	G_{23}	E_1	G_{23}
0-1	50°C	109.70	5.30	109.70	5.29	109.70	5.28	109.70	5.28	109.70	5.29	109.70	5.28	109.70	5.28	109.70	5.29
0-2	75°C	111.56	5.35	111.56	5.23	111.59	5.22	111.59	5.24	111.56	5.23	111.59	5.24	111.59	5.24	111.59	5.22
0-3	100°C	115.06	5.53	115.06	5.35	115.07	5.33	115.09	5.35	115.10	5.33	115.10	5.33	115.12	5.34	115.14	5.33
0-4	125°C	114.91	5.66	114.93	5.46	114.93	5.47	115.00	5.52	115.07	5.52	115.12	5.53	115.14	5.55	115.17	5.53
0-5	150°C	112.04	5.39	112.56	5.30	112.60	5.26	112.63	5.26	112.65	5.28	112.65	5.28	112.65	5.27	112.65	5.24
0-6	175°C	106.99	5.13	107.62	4.98	107.60	4.99	107.62	4.99	107.62	4.99	107.62	4.98	107.62	4.99	107.62	5.00
0-7	200°C	115.99	5.61	116.18	5.43	116.71	5.44	116.76	5.53	116.74	5.48	116.76	5.48	116.79	5.45	116.79	5.45
0-8	225°C	114.01	5.63	114.38	5.52	114.89	5.48	114.89	5.46	114.93	5.46	114.93	5.51	114.93	5.49	114.98	5.49

Table 4. Variation of moduli (E_2, G_{13})

(unit : GPa)

No.	Peak temperature in thermal cycle	0 rev		10 rev		20 rev		30 rev		40 rev		50 rev		60 rev		70 rev	
		E_2	G_{13}	E_2	G_{13}	E_2	G_{13}	E_2	G_{13}	E_2	G_{13}	E_2	G_{13}	E_2	G_{13}	E_2	G_{13}
90-1	50°C	8.65	4.93	8.63	4.91	8.63	4.91	8.63	4.91	8.63	4.91	8.63	4.91	8.63	4.91	8.63	4.91
90-2	75°C	8.37	4.72	8.24	4.67	8.28	4.66	8.16	4.66	8.19	4.66	8.19	4.66	8.16	4.66	8.19	4.66
90-3	100°C	8.29	4.81	8.18	4.75	8.11	4.74	8.17	4.76	8.17	4.74	8.18	4.76	8.17	4.76	8.12	4.74
90-4	125°C	8.87	4.97	8.39	4.87	8.9	4.89	8.60	4.90	8.71	4.91	8.70	4.90	8.73	4.89	8.70	4.87
90-5	150°C	8.50	4.84	8.43	4.82	8.39	4.82	8.36	4.80	8.37	4.79	8.29	4.79	8.33	4.80	8.34	4.79
90-6	175°C	8.87	4.98	8.72	4.92	8.70	4.92	8.67	4.90	8.73	4.92	8.74	4.92	8.76	4.92	8.72	4.93
90-7	200°C	8.93	5.01	8.81	4.99	8.72	4.92	8.72	4.92	8.71	4.91	8.71	4.92	8.71	4.91	8.71	4.91
90-8	225°C	8.62	4.78	8.53	4.75	8.51	4.74	8.51	4.73	8.45	4.69	8.43	4.69	8.43	4.70	8.43	4.69

영향으로 인하여 실험의 결과와 같은 탄성계수의 미소한 변화가 발생하였다. 기지재료로 사용되는 epoxy는 70°C부터 120°C~150°C사이에서 점도의 변화 및 경화가 일어나는데 주로 이 epoxy의 영향이 미치는 E_2, G_{23} 값 변화가 이 때 발생하고 125°C에서 가장 큰 변화를 보이는 것도 이런 이유에서라고 생각된다. 하지만 변화율은 2% 미만으로 100회 미만의 사이클 횟수에서는 재료의 기계적 성질 저하 영향은 없다고 예측할 수 있다. 그러나 보강재료로 쓰이는 carbon이 주로 영향을 미치는 E_1 의 경우는 75°C~225°C에서 carbon의 물성이 큰 변화를 보이지 않으므로 E_1 값의 변화는 이 온도에서 발생하는 epoxy의 경화와 carbon의 복합적인 영향으로 보인다. 마지막으로 G_{13} 의 경우도 약간 감소하였으나 거의 변화하지는 않았다.

5. 결론

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 휨(Flexural), 비틀림 공진 주파수(Torsional Resonance Frequency)를 측정하여 E_1, E_2, G_{13} ($= G_{12}$), G_{23} 값을 구하였다. 또한 반복 열 사이클에 따른 공진 주파수의 변화와 그에 따른 탄성계수의

변화를 살펴보았다. 이 연구에서 G_{13} 값은 반복 열 사이클 회수에 대하여 약간 감소하기는 하였으나 별다른 변화를 보이지 않았다. E_1 값은 가해진 열 사이클 최고 온도와 열 사이클의 횟수에 비례하여 거의 변화가 없고 E_2, G_{23} 값은 열 사이클이 가해지면 처음에는 어느 정도 그 값이 감소하나 가해진 횟수에는 큰 영향을 받지 않았다. 이런 특성은 기지재료로 쓰이는 epoxy의 점도 변화 및 경화 영향으로 보인다. 이상의 결과에서 본 실험에서 적용된 열 사이클 회수와 최고 온도 범위의 경우 탄소 복합재료의 기계적 성질 값은 크게 저하되지 않는다고 판단할 수 있다.

참고문헌

- (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)