

동적기계분석장치를 이용한 탄소섬유/에폭시 복합재의 장기 성능 예측

차재호* · 윤성호*†

Long-Term Performance Prediction of Carbon Fiber Reinforced Composites Using Dynamic Mechanical Analyzer

Jae Ho Cha*, Sung Ho Yoon*†

ABSTRACT: This study focused on the prediction of the long-term performance of carbon fiber/epoxy composites using Dynamic Mechanical Analysis (DMA) and Time-Temperature Superposition (TTS). Single-frequency test, multi-frequency test, and creep TTS test were performed. A sinusoidal load of 20 μm amplitude was applied while increasing the temperature from -30°C to 240°C at $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ for the single-frequency test and the multi-frequency test. The frequencies applied to the multi-frequency test were 0.316, 1, 3.16, 10 and 31.6 Hz. In the creep TTS test, a stress of 15 MPa was applied for 10 minutes at every 10°C from -30°C to 230°C . The glass transition temperature was determined by single-frequency test. The activation energy and the storage modulus curve for each temperature were obtained from glass transition temperature for each frequency by the multi-frequency test. The master curve for the reference temperature was obtained by applying the shift factor using the Arrhenius equation. Also, TTS test was used to obtain the creep compliance curves for each temperature and the master curve for the reference temperature by applying the shift factors using the manual shift technique. The master curve obtained through this process can be applied to predict the long-term performance of carbon fiber/epoxy composites for a given environmental condition.

초 록: 본 연구에서는 동적기계분석장치(dynamic mechanical analysis, DMA)와 시간-온도 중첩법(time-temperature superposition, TTS)을 이용하여 탄소섬유/에폭시 복합재의 장기 성능을 예측하고자 하였다. 이를 위해 단일 진동수 시험, 다중 진동수 시험, 크리프 TTS 시험을 수행하였다. 단일 진동수(single-frequency) 시험과 다중 진동수(multi-frequency) 시험에서는 -30°C 에서 240°C 까지 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로 온도를 상승시키면서 20 μm 진폭의 사인(sine) 파형의 하중을 가하였으며 다중 진동수 시험에 적용된 진동수는 0.316, 1, 3.16, 10, 31.6 Hz이다. 크리프 TTS 시험에서는 -30°C 에서 230°C 까지 10°C 마다 15 MPa의 응력을 10분 동안 가하였다. 단일 진동수 시험을 통해 유리전이온도를 구하였으며 다중 진동수 시험을 통해 진동수 별 유리전이온도에서 활성화 에너지와 온도 별 저장탄성계수 선도를 구하였다. 또한 아레니우스 식(Arrhenius equation)을 통해 얻은 이동 인자를 적용하여 기준 온도에 대한 마스터 선도를 얻었다. 또한 크리프 TTS 시험을 통해서도 크리프 컴플라이언스 선도를 구하고 직접 이동 기법을 이용하여 구한 이동 인자를 적용하여 기준 온도에 대한 마스터 선도를 얻었다. 이와 같은 과정을 통해 얻은 마스터 선도를 이용하면 주어진 환경 조건에 대한 탄소섬유강화 복합재의 장기 성능을 예측할 수 있다.

Key Words: 동적기계분석장치(Dynamic mechanical analyzer), 시간-온도 중첩법(Time-temperature superposition), 이동 인자(Shift factor), 마스터 선도(Master curve), 탄소섬유/에폭시 복합재(Carbon fiber/epoxy composite), 장기 성능(Long-term performance)

Received 19 January 2019, received in revised form 8 February 2019, accepted 20 February 2019

*Department of Mechanical Engineering, Kumoh National University of Technology

*†Department of Mechanical Engineering, Kumoh National University of Technology, Corresponding author (E-mail: shyoon@kumoh.ac.kr)

1. 서 론

탄소섬유/에폭시 복합재는 점탄성 거동을 갖는 고분자 수지로 인해 시간이 지남에 따라 특성이 점차 변하게 된다. 이와 같은 탄소섬유/에폭시 복합재를 효율적으로 구조재에 적용하기 위해서는 넓은 운용시간 범위에서의 특성 변화를 이해하고 복합재의 장기 성능을 예측할 수 있어야 한다.

최근까지 복합재의 장기 성능을 예측하기 위해 실시간 시험과 가속노화시험 등이 진행되어 왔다. Hwang 등[1]은 탄소섬유/에폭시 복합재 압력용기의 노화 및 수명 평가를 위해 실내 및 실외에서 10년과 15년간 자연노화시험을 수행하여 섬유 방향 파손 변형률은 평균값 기준으로 실내에서 10년 노화된 경우 19%, 실외에서 15년 노화된 경우 23%가 저하되었으며 실내외 노화로 인한 강도 저하는 크지 않음을 보였다. 이와 같은 자연노화시험은 유사한 환경 조건이 적용된 실제 데이터를 얻을 수 있으며 시편 기반 시험이 아닌 제품을 직접 이용할 수 있다는 장점이 있지만 많은 시간과 비용을 필요로 한다. Yoon 등[2]은 탄소섬유/에폭시 복합재의 노화 특성을 평가하기 위해 가속노화시험기를 이용하여 온도, 수분, 자외선 등의 환경 인자를 최대 3000시간까지 시편에 노출시킨 다음 인장 특성과 굽힘 특성을 평가하고 전자현미경을 통해 노화 표면을 관찰하였다. 이들에 따르면 인장강성은 환경 인자의 노출시간에 큰 영향을 받지 않지만 인장강도, 굽힘강도, 굽힘탄성계수는 노출 초기에는 다소 증가하다가 노출시간이 길어지면 감소한다고 하였다. Hwang 등[3]은 염수 환경이 탄소섬유/에폭시 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 열습 시험을 수행하였다. 이들에 따르면 노출 온도와 노출 시간에 따른 인장 강성과 인장 강도는 감소 정도가 크지 않지만 압축 강성과 압축 강도는 감소 정도가 크게 나타난다고 하였다. Yoon 등[4]은 탄소섬유/에폭시 복합재의 장기 성능을 평가하기 위해 분위기 온도가 50°C, 75°C, 100°C에서의 건조 조건과 분위기 온도가 25°C, 50°C, 70°C에서의 침수 조건에 각각 3000시간까지 노출시킨 후의 중간전단강도를 평가하였다. 이들에 따르면 건조 조건에서 노출 시간에 대한 중간전단강도의 변화는 크지 않지만 침수 조건의 경우 노출시간이 길어지면 중간전단강도가 점차 감소하며 분위기 노출 온도가 높아지면 감소 정도가 더 커진다고 하였다. 이와 같이 가속노화시험을 이용한 장기 성능 평가는 실시간 시험에 비하여 단기간에 노화 특성을 평가할 수 있지만 가속노화시간을 실시간으로 환산할 수 있는 가속화 계수가 필요하다.

최근에는 점탄성 거동을 나타내는 고분자 복합재의 장기 성능을 예측하기 위해 시간-온도 중첩법(time-temperature superposition, TTS)을 적용한 시도가 행해지고 있다. 이는 온도와 시간은 서로 반비례 관계가 있다는 사실에 기인하여 복합재에 노출 온도를 상승시켜 주면 노출 시간을 단축

시키기는 효과를 얻을 수 있는 방법이다. Goertzen 등[5]은 탄소섬유/에폭시 복합재의 크리프(creep) 거동을 조사하기 위해 DMA 시험을 통해 얻은 시험 결과에 시간-온도 중첩법을 적용하여 마스터 선도를 구하였다. 이들은 마스터 선도를 얻기 위해 아레니우스 식(Arrhenius equation)과 직접 이동 기법을 적용하여 이동인자를 구하였으며 기준 온도가 30~50°C인 경우의 마스터 선도를 통해 50년 후의 탄성계수는 16~58%까지 감소된다고 하였다. Keller 등[6]은 수분이 탄소섬유/에폭시 복합재의 크리프 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 최대 18개월 동안 수분 노출 시험을 수행하였다. 이들에 따르면 수분은 탄소섬유/에폭시 복합재의 활성화 에너지를 감소시키고 11개월 노출된 경우와 18개월 노출된 경우에는 큰 차이가 없으며 18개월 수분에 노출된 경우는 대기 상태에 노출된 경우에 비해 크리프 현상이 크게 나타난다고 하였다.

시간-온도 중첩법을 적용한 장기 성능 예측은 실시간 시험이나 가속노화시험에서는 현실적으로 어려운 다양한 온도에 노출된 경우의 정보들을 제공해 준다. 본 연구에서는 저온에서부터 고온까지 다양한 온도에 대해 DMA를 적용하여 단일 진동수(single-frequency) 시험, 다중 진동수(multi-frequency) 시험, 크리프 TTS 시험을 수행하고 저장탄성계수와 크리프 컴플라이언스에 대한 마스터 선도를 얻어 탄소섬유/에폭시 복합재의 장기 성능을 예측하였다.

2. 시험방법

2.1 시편 형상

에폭시 수지에 탄소섬유가 함침된 프리프레그 (CU150NS, Hankuk Fiber Glass Co., Korea)를 적층하여 제작한 일방향 복합재 평판에서 길이가 35 mm, 폭이 13.5 mm, 두께가 1 mm인 시편을 채취하였다. Fig. 1에는 동적기계분석장치에 17.5 mm의 스패를 갖는 시편이 장착된 단일 외팔보(single cantilever) 시험치구의 형상이 나타나 있다.

2.2 단일/다중 진동수 시험

복합재의 유리전이온도(glass transition temperature)를 측정하기 위해 DMA(Q800, TA Instruments, USA)를 이용하여 단일 진동수 시험을 수행하였다. 이때 온도는 -30°C에서 240°C

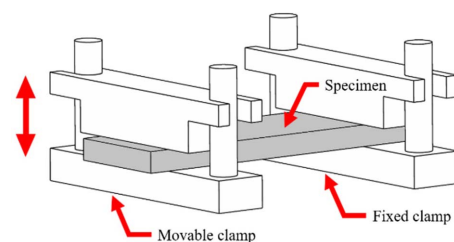


Fig. 1. Configuration of single cantilever fixture with specimen

까지 2°C/min로 상승시키면서 진폭 20 μm 의 사인(sine) 파형의 하중을 가하였다. 또한 복합재의 장기 성능을 예측하기 위해 DMA를 이용한 다중 진동수 시험도 수행하였다. 이때 진동수는 등 간격 로그 스케일 선도를 구하기 위해 0.316, 1, 3.16, 10, 31.6 Hz를 적용하였으며 온도는 단일 주파수 시험과 동일하게 -30°C에서 240°C까지 2°C/min로 상승시켰다. 시험 시간을 단축시키기 위해 유리전이온도 구간 부근에서는 2.5~5°C 간격, 유리전이온도에서 떨어진 구간에서는 10°C 간격으로 자료를 수집하였다.

2.3 크리프 TTS 시험

시편에 응력을 가하면 응력에 상응하는 변형이 시편에 발생하게 되며 시편에 일정 응력을 가한 상태로 두어도 시간이 경과되면 시편에 점차적인 변형이 생기는 크리프 현상이 발생한다. 복합재의 장기 성능 예측에 필요한 크리프 컴플라이언스를 얻기 위해 DMA를 이용하여 크리프 TTS 시험을 수행하였다. 이때 온도는 -30°C에서 230°C까지 2°C/min로 상승시키면서 매 10°C마다 10분 동안 15 MPa의 응력을 가하였다.

3. 시험결과

3.1 단일 진동수 시험

Fig. 2에는 단일 진동수 시험을 통해 얻은 저장탄성계수 선도, 손실탄성계수 선도, $\tan \delta$ 선도가 나타나 있다. 유리전이온도는 저장탄성계수 선도의 시작점, 손실탄성계수 선도의 최고점, $\tan \delta$ 선도의 최고점에서 결정된다. 이들 중 저장탄성계수 선도에서 결정된 유리전이온도는 보수적인 값을 제공해 주며 손실탄성계수 선도와 $\tan \delta$ 선도에서 결정된 유리전이온도는 최고점이 명확하여 쉽게 구할 수 있는 장점이 있다. 유리전이온도는 저장탄성계수 선도의 시작점에서 구하면 109.0°C, 손실탄성계수 선도의 최고점에서 구하면 121.5°C, $\tan \delta$ 선도의 최고점에서 구하면 126.7°C로서 이들 정보는 다중 진동수 시험에 적용될 온도 구간을 설정하는데 적용하였다.

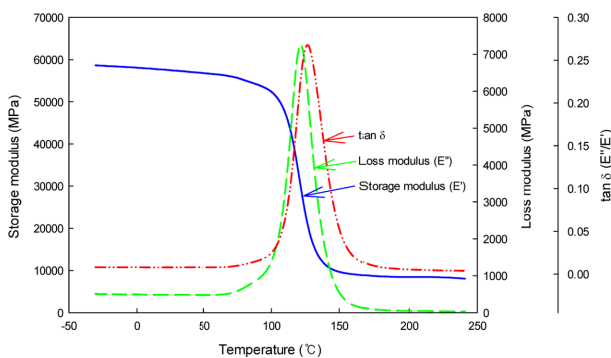


Fig. 2. Thermal analysis data obtained from single-frequency

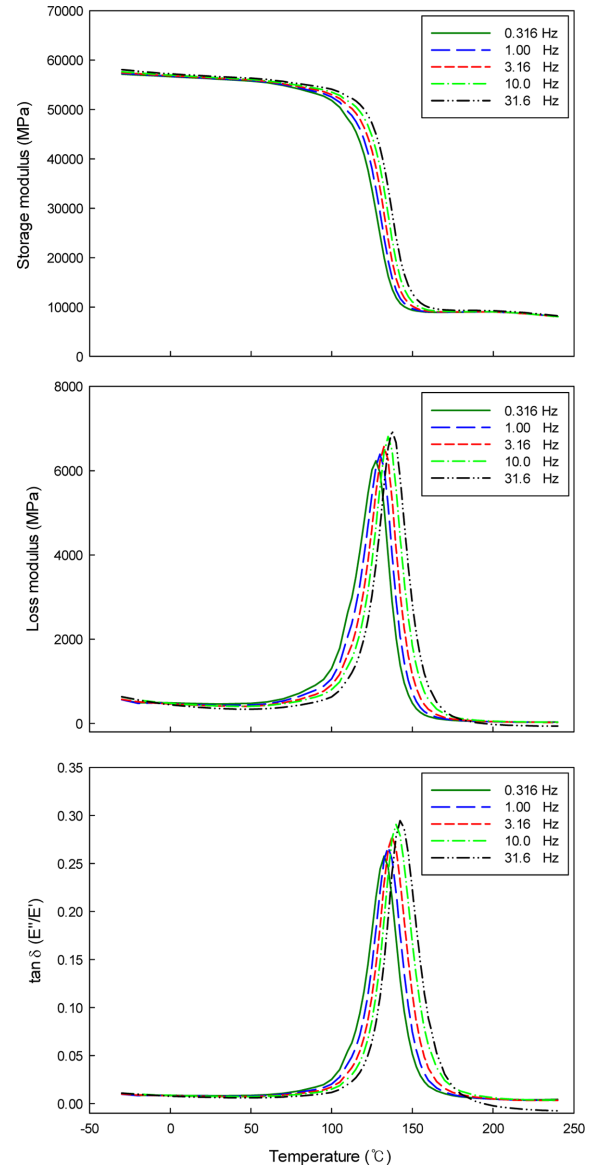


Fig. 3. Thermal analysis data obtained from multi-frequency test

3.2 다중 진동수 시험

Fig. 3에는 다중 진동수 시험을 통해 얻은 진동수 별 저장탄성계수 선도, 손실탄성계수 선도, $\tan \delta$ 선도가 나타나 있다. 저장탄성계수 선도의 시작점에서 결정되는 유리전이온도는 진동수가 높아지면 점차 높게 나타나고 손실탄성계수 선도와 $\tan \delta$ 선도에서도 동일한 양상이 관찰된다. 손실탄성계수 선도와 $\tan \delta$ 선도의 베이스라인에서 최고점까지의 크기인 최고점 세기도 진동수가 높아지면 점차 크게 나타난다. 또한 손실탄성계수 선도와 $\tan \delta$ 선도에서 최고점 세기의 50%인 지점에서 결정되는 밴드 폭도 진동수가 높아지면 넓게 나타난다.

Table 1과 Table 2에는 다중 진동수 시험을 통해 얻은 저장탄성계수 선도, 손실탄성계수 선도, $\tan \delta$ 선도에서 결정

Table 1. Comparison of glass transition temperatures obtained from storage modulus curve, loss modulus curve and $\tan \delta$ curve by varying oscillation frequency

Frequency (Hz)	T_g (°C)		
	Storage modulus onset point	Loss modulus peak	$\tan \delta$ peak
0.316	113.89	127.50	132.50
1	117.38	129.99	135.00
3.16	121.20	132.50	137.50
10	123.40	135.00	140.00
31.6	125.70	137.50	142.51

Table 2. Glass transition temperature, peak point intensity, and bandwidth obtained from $\tan \delta$ curve by varying oscillation frequency

Hz	T_g	Peak intensity	Bandwidth
0.316	132.5	0.251	20.50
1	135.0	0.262	20.50
3.16	137.5	0.273	20.70
10	140.0	0.285	21.32
31.6	142.5	0.296	22.59

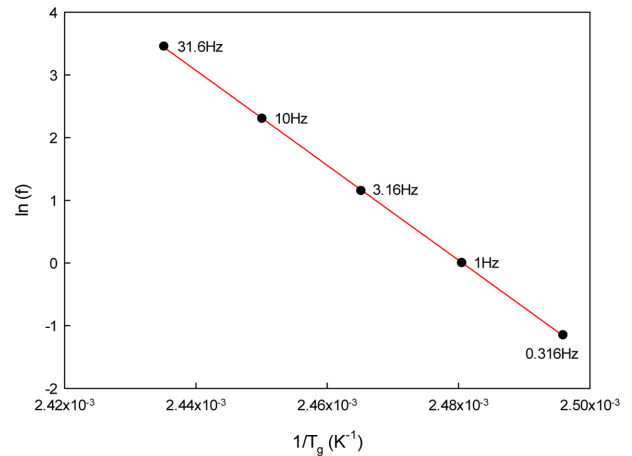
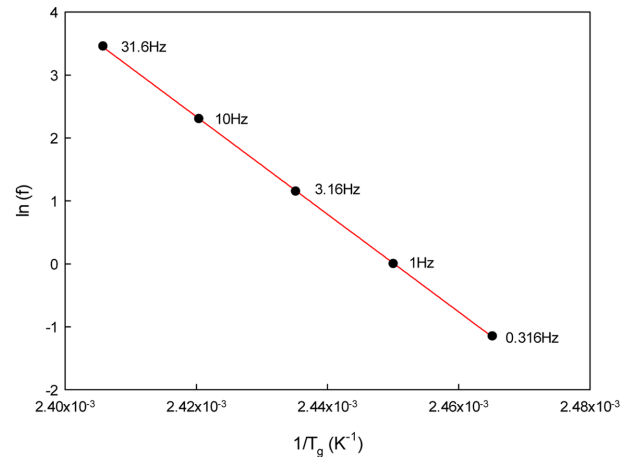
된 진동수 별 유리전이온도 및 $\tan \delta$ 선도에서 구한 진동수 별 유리전이온도, 최고점 세기, 밴드 폭이 각각 나타나 있다. 여기에서 보면 진동수는 유리전이온도, 최고점 세기, 밴드 폭에 영향을 미치며 진동수가 높아지면 유리전이온도와 최고점 세기는 점차 높아지고 밴드 폭은 일정 진동수까지는 변화가 없다가 일정 진동수보다 높아지면 넓어진다.

복합재에 전이를 유발시키는데 필요한 활성화 에너지 (activation energy)는 진동수와 유리전이온도를 알면 식 (1)에 의해 구할 수 있다. 활성화 에너지는 x축을 유리전이온도의 역수, y축을 로그 진동수로 나타낸 선도의 기울기에 일반기체상수를 곱한 다음 음의 부호를 부여하면 결정된다[7].

$$\Delta H = -R \frac{d \ln(f)}{d(1/T_g)} \quad (1)$$

이때 ΔH 는 활성화 에너지, R 은 일반기체상수, T_g 는 유리전이온도, f 는 진동수이다.

Fig. 4와 5에는 손실탄성계수 선도에서 구한 유리전이온도와 $\tan \delta$ 선도의 최고점에서 구한 유리전이온도가 x축을 유리전이온도의 역수, y축을 로그 진동수인 선도에 각각 나타나 있다. 여기에서 보면 손실탄성계수 선도의 최고점에서 결정된 유리전이온도에서 구한 기울기는 -75735이고 이 기울기에 일반기체상수를 곱하고 음의 부호를 부여하여 구한 활성화 에너지는 629.7 KJ/mol이다. 또한 $\tan \delta$ 선도의 최고점에서 결정된 유리전이온도에서 구한 기울기는 -77585

**Fig. 4.** Variation of T_g as measured by the loss modulus peak with the DMA test frequency**Fig. 5.** Variation of T_g as measured by the $\tan \delta$ peak with the DMA test frequency

이고 동일한 방법으로 구한 활성화 에너지는 645.0 KJ/mol이다. 이때 $\tan \delta$ 선도의 최고점에서 얻어진 활성화 에너지는 손실탄성계수 선도에서 얻어진 경우에 비해 보수적이기 때문에 본 연구에서는 $\tan \delta$ 선도의 최고점에서 결정된 유리전이온도를 적용하였다.

3.3 크리프 TTS 시험

Fig. 6에는 -30°C에서 230°C까지 매 10°C마다 10분간 15 MPa의 응력을 가하여 측정한 크리프 컴플라이언스 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 크리프 컴플라이언스는 가해진 응력에 대해 유리전이온도 영역인 110~140°C에서 변화가 크지만 유리전이온도에서 멀어지면 가해진 응력에 대해 변화는 크지 않고 거의 일정하게 나타난다.

3.4 마스터 선도

Fig. 7에는 다중 진동수 시험을 통해 얻은 진동수 별 저장

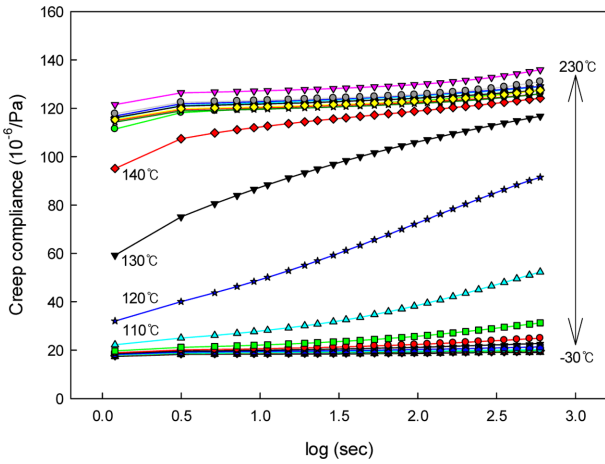


Fig. 6. Creep compliance at various temperatures.

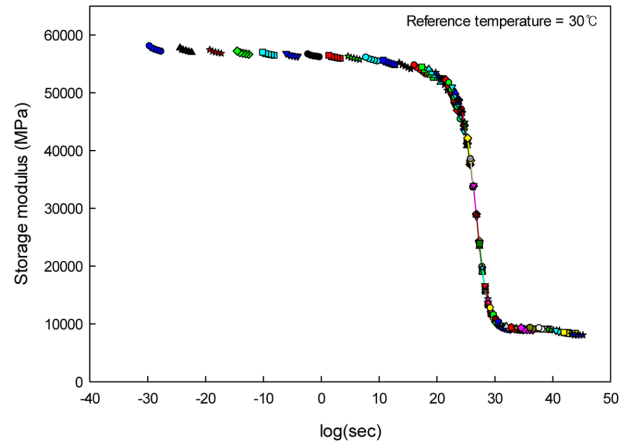


Fig. 8. Master curve of storage modulus

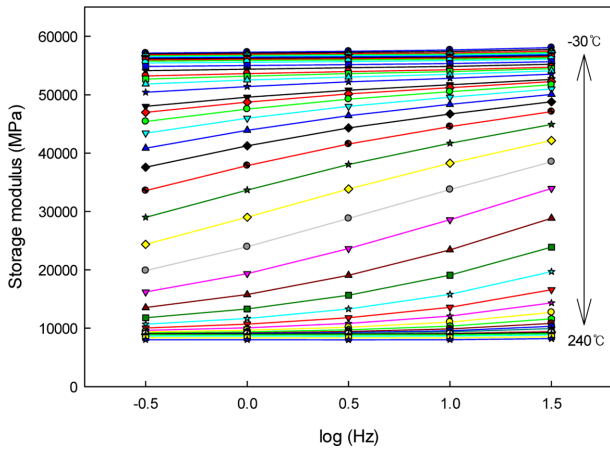
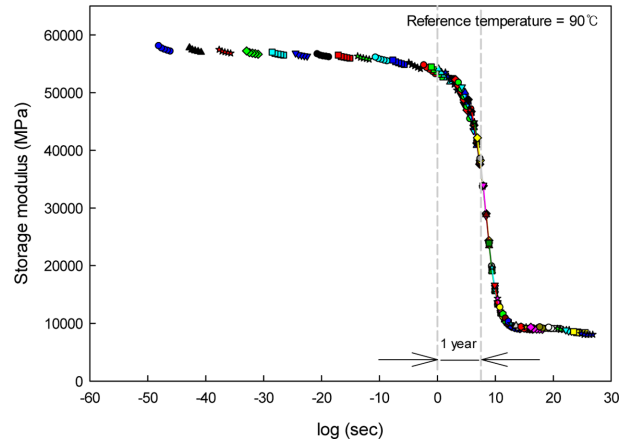


Fig. 7. Storage modulus at various temperatures

Fig. 9. Master curve of storage modulus at $T_{ref} = 90^\circ\text{C}$

탄성계수들이 온도에 따라 나타나 있다. 여기에서 보면 저장탄성계수는 크리프 컴플라이언스와는 달리 온도가 낮을수록 높아지며 유리전이온도 영역에서 변화 폭이 커진다. 마스터 선도는 기준 온도의 저장탄성계수 선도를 기준으로 다른 온도의 저장탄성계수 선도를 좌우로 이동시켜 중첩시키면 얻을 수 있다. 이때 선도의 움직임 정도를 나타내는 이동 인자는 다중 진동수 시험의 경우 식 (2)에 나타난 아레니우스 식을 적용하면 구할 수 있다[7].

$$\log a_T = \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \log e \quad (2)$$

이때 T_0 는 기준 온도, ΔH 는 활성화 에너지(645.0 KJ/mol)이다.

크리프 TTS 시험의 경우 이동 인자는 DMA 데이터 분석 프로그램(Rheology Advantage, TA Instruments, USA)을 이용하여 데이터를 직접 이동시키면 구할 수 있다.

Fig. 8에는 기준 온도가 30°C인 경우 기준 온도를 기준으로 다른 온도의 저장탄성계수 선도를 이동 인자만큼 이동시켜 중첩시킨 마스터 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면

저장탄성계수는 시간이 경과되면 서서히 감소하지만 로그 시간이 약 20이 되는 시점에서 급격하게 감소하며 로그 시간이 약 30이 되는 시점부터는 다시 서서히 감소하는 양상을 나타낸다.

Fig. 9에는 기준 온도가 90°C인 경우 Fig. 8에서와 같은 동일한 방법을 적용하여 구한 마스터 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 마스터 선도는 기준 온도가 30°C인 마스터 선도에 비해 이동 인자만큼 왼쪽으로 이동되어 있으며 이를 이용하면 장기간 후의 저장탄성계수를 예측할 수 있다. 이때 1년 후의 저장탄성계수는 35000 MPa로서 초기 저장탄성계수인 53500 MPa에 비해 35% 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 10에는 Fig. 8의 마스터 선도를 얻기 위해 적용한 이동 인자를 온도의 역수에 대해 도시한 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 식 (2)에 의해 구한 이동 인자는 온도의 역수에 대해 선형적으로 나타난다. 이와 같이 이동 인자가 온도의 역수에 대해 선형적인 경우에는 마스터 선도는 하나의 선도로 중첩된다. 그러나 온도의 역수에 대해 선형적이지 않은 경우에는 마스터 선도를 얻기 위해 직접 이동 기

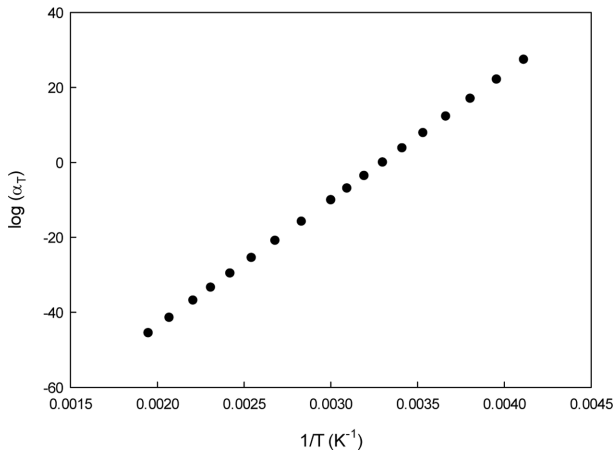


Fig. 10. Shift factors using Arrhenius equation

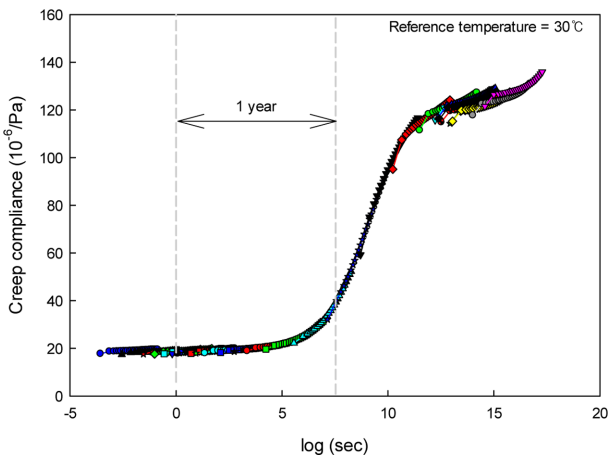


Fig. 11. Master curve of creep compliance

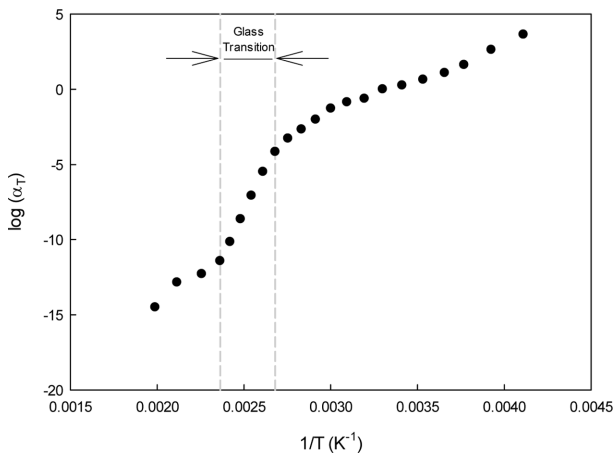


Fig. 12. Shift factors obtained from creep TTS test

법을 적용해야 한다.

Fig. 11에는 기준 온도가 30°C인 경우 직접 이동 기법으로 기준 온도를 기준으로 다른 온도의 크리프 컴플라이언스 선도를 이동 인자만큼 이동시켜 중첩 시킨 마스터 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 크리프 컴플라이언스는 특정

시간 내에 도달할 때까지는 시간이 경과되어도 거의 변하지 않다가 특정 시간 내에 도달하면 급격히 증가하고 시간이 더욱 길어지면 다시 큰 변화가 없이 거의 일정하게 나타난다. 이때 기준 온도가 30°C인 경우 1년 후의 크리프 컴플라이언스는 $40 \times 10^{-6} \text{ 1/Pa}$ 로서 초기 크리프 컴플라이언스인 $18 \times 10^{-6} \text{ 1/Pa}$ 에 비해 220% 높게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 12에는 Fig. 11의 마스터 선도를 얻기 위해 직접 이동 기법을 적용하여 구한 이동 인자를 온도의 역수에 대해 도시한 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 Fig. 10에 나타난 이동 인자 선도와는 달리 선형적이지 않으며 유리전이온도 영역에서 기울기가 증가되어 가파르게 나타난다.

4. 결 론

탄소섬유강화 복합재의 DMA와 시간-온도 중첩법을 이용한 장기간 성능 예측을 위한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단일 진동수 시험을 통해 얻은 저장탄성계수 선도, 손실탄성계수 선도, $\tan \delta$ 선도에서 유리전이온도를 구할 수 있으며 이들 정보는 다중 진동수 시험에 적용될 온도 구간의 설정에 활용된다.

(2) 다중 진동수 시험을 통해 얻어지는 유리전이온도는 가해진 진동수에 영향을 받으며 진동수가 높아지면 손실탄성계수 선도와 $\tan \delta$ 선도에서 결정되는 최고점 세기도 커지며 밴드 폭도 넓어짐을 알 수 있었다.

(3) 크리프 TTS 시험을 통해 얻은 결과에서 크리프 컴플라이언스는 유리전이온도 영역에서 큰 변화가 생기지만 유리전이온도에서 멀어지면 변화가 없이 거의 일정해짐을 알 수 있었다.

(4) 다중 진동수 시험을 통해 얻은 저장탄성계수 선도와 크리프 컴플라이언스 선도를 통해 얻어진 마스터 선도를 이용하면 주어진 환경 조건에 대한 기준 온도에서의 장기 성능을 예측할 수 있다.

후 기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(2018-104-020).

REFERENCES

- Hwang, T.K., Park, J.B., Kim, H.G., and Doh, Y.D., "Natural Aging Effects on the Fiber Tensile Strength of Carbon Epoxy Pressure Vessel," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 2, 2007, pp. 1-9.
- Yoon, S.H., and Oh, J.H., "Aging Characteristics of Carbon Fiber/Epoxy Composite Ring Specimen," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, No. 6, 2009, pp. 39-44.

3. Hwang, Y.E., and Yoon, S.H., "Hygrothermal Effect of Salt-Water Environments on Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Composites," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 36, No. 10, 2012, pp. 1261-1266.
4. Yoon, S.H., and Shi, Y.L., "Prediction of Long-Term Interlaminar Shear Strength of Carbon Fiber/Epoxy Composites Exposed to Environmental Factors," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 30, No. 1, 2017, pp. 71-76.
5. Goertzen, W.K., and Kessler, M.R., "Creep Behavior of Carbon Fiber/epoxy Matrix Composites," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 421, 2006, pp. 217-225.
6. Keller, M.W., Jellison, B.D., and Ellison, T., "Moisture Effects on the Thermal and Creep Performance of Carbon Fiber/Epoxy Composites for Structural Pipeline Repair," *Composites: Part B*, Vol. 45, 2013, pp. 1173-1180.
7. Goertzen, W.K., and Kessler, M.R., "Dynamic Mechanical Analysis of Carbon/Epoxy Composites for Structural Pipeline Repair," *Composites: Part B*, Vol. 38, 2007, pp. 1-9.