

환경인자에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재의 장기 층간전단강도 예측

윤성호^{*†} · Shi Ya Long^{**}

Prediction of Long-Term Interlaminar Shear Strength of Carbon Fiber/Epoxy Composites Exposed to Environmental Factors

Sung Ho Yoon^{*†}, Ya Long Shi^{**}

ABSTRACT: The purpose of this study was to predict the long-term performance using the interlaminar shear strength of carbon fiber/epoxy composites exposed to environmental factors. Interlaminar shear specimens, manufactured by the filament winding method, were exposed to the conditions of drying at 50°C, 70°C, and 100°C and of immersion at 25°C, 50°C, and 70°C for up to 3000 hours, respectively. According to the results, the interlaminar shear strength did not vary significantly with the exposure time for the drying at 50°C and 70°C, but it increased somewhat for the drying at 100°C due to the post curing as the exposure time increased. The interlaminar shear strength of the specimens exposed to the immersion at 25°C did not change significantly at the beginning of exposure, but it decreased with the exposure time and the degree of decrease increased as the environmental temperature increased. The linear regression equations for the environmental temperatures were obtained from the interlaminar shear strength of the specimens exposed to the immersion for up to 3000 hours. Using these linear regression equations, the interlaminar shear strength was estimated to be within 5.5% of the measured value at 25°C and 50°C, and 2.3% of the measured value at 70°C. Therefore, the proposed performance prediction procedures can predict well the long-term interlaminar shear strength of carbon fiber/epoxy composites exposed to environmental factors.

초 록: 본 연구에서는 환경인자에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재의 층간전단강도를 이용하여 장기 성능을 예측하였다. 필라멘트와인딩 공법으로 제작된 층간전단시편은 분위기 온도가 50°C, 70°C, 100°C인 건조 조건과 분위기 온도가 25°C, 50°C, 70°C인 침수 조건에 각각 3000시간까지 노출시켰다. 연구결과에 따르면 분위기 온도가 50°C와 70°C인 건조 상태에서는 층간전단강도가 노출시간에 따라 크게 변하지 않지만 분위기 온도가 100°C인 건조 상태에서는 노출시간이 길어지면 후경화로 인해 다소 증가한다. 그러나 분위기 온도가 25°C인 침수 상태의 경우 층간전단강도는 노출 초기에 크게 변하지 않다가 노출시간이 길어지면 감소하고 감소 정도는 분위기 온도가 높아지면 커진다. 각 분위기 온도에 대한 층간전단강도 선형회귀식은 침수 상태에 3000시간까지 노출된 시편에서 얻은 층간전단강도에서 구할 수 있었다. 이들 선형 회귀식을 이용하면 층간전단강도는 분위기 온도가 25°C와 50°C인 경우 측정값의 5.5% 이내, 분위기 온도가 70°C인 경우 측정값의 2.3% 이내로 예측이 가능하였다. 따라서 제시된 성능 예측 절차는 환경인자에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재의 장기 층간전단강도를 잘 예측할 수 있다.

Key Words: 환경인자(Environmental factors), 탄소섬유/에폭시 복합재(Carbon fiber/epoxy composites), 층간전단시편(Interlaminar shear specimens), 선형회귀식(Linear regression equation), 장기 층간전단강도(Long-term interlaminar shear strength)

Received 25 December 2016, received in revised form 15 February 2017, accepted 28 February 2017

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

^{**}Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology, Korea

1. 서 론

비강성, 비강도, 내열성, 내부식성 등이 우수한 탄소섬유/에폭시 복합재는 탄소섬유를 에폭시에 함침시킨 반경화 상태의 프리프레그를 원하는 각도와 두께로 적층하거나 에폭시에 함침된 탄소섬유를 원하는 각도와 두께로 맨드렐에 와인딩하여 제작된다. 이때 탄소섬유는 강성과 강도가 매우 높고 결정구조도 매우 안정적이며 환경인자의 영향도 거의 받지 않는다. 열경화성 수지인 에폭시는 탄소섬유를 결속시켜 탄소섬유가 하중을 지지하게 하고 물리적 및 화학적 유해인자로부터 탄소섬유를 보호하는 역할을 하지만 강성과 강도 등의 기계적 특성이 낮고 환경인자에 쉽게 영향을 받기 때문에 환경인자에 장기간 노출되면 물리적 특성과 기계적 특성이 저하된다.

탄소섬유/에폭시 복합재의 경우 섬유 방향으로의 기계적 특성은 매우 우수하지만 섬유에 직교하는 방향 또는 층과 층 사이의 층간면은 에폭시가 지배적인 영역으로 과도한 외부하중에 의해 층간분리가 쉽게 발생하며 환경인자에 노출되는 경우 노화가 유발되는 구조적으로 취약한 부위이다. 탄소섬유/에폭시 복합재의 취약한 부위인 층간면의 기계적 특성과 환경인자 영향을 고려한 내구성의 평가에 대해서는 지금까지도 많은 연구가 진행되고 있다. Taylor 등[1]은 등온 노화가 열경화성 수지를 갖는 탄소섬유/비스말레이미드 복합재와 열가소성 수지를 갖는 탄소섬유/폴리이미드 복합재의 층간전단강도에 미치는 영향을 조사하였다. 이들에 따르면 탄소섬유/비스말레이미드 복합재를 등온 노화시키면 초기에는 후경화로 인해 층간전단강도가 다소 증가하지만 노출시간이 길어지면 노화가 지배적으로 나타나 층간전단강도가 점차 저하되고 노출온도가 높아지면 저하 정도는 현저하게 나타난다고 하였다. 그러나 탄소섬유/폴리이미드 복합재는 후경화가 나타나지 않고 노출시간이 길어지면 층간전단강도는 저하하지만 노출온도에 큰 영향을 받지 않는다고 하였다. Yoon 등[2]은 염수침수환경 및 염수분무환경에 6개월까지 노출시킨 유리섬유직물/페놀 복합재의 내구성을 평가하였다. 이들에 따르면 복합재의 강도는 노출시간이 길어지면 점차 감소하지만 강성은 노출 초기에 다소 증가하다가 노출시간이 더욱 길어지면 복합재의 팽창, 수지 소성화 등으로 인해 감소한다고 하였다. Hwang 등[3]은 온도, 수분, 자외선을 모사할 수 있는 가속노화시험장치를 이용해 복합적 환경인자에 3000시간까지 노출시킨 탄소섬유/에폭시 복합재의 열분석특성과 화학구조분석을 수행하였다. 이들에 따르면 MDSC 시험을 통해 노출시간이 길어지면 복합재 내에 치밀한 망사 구조가 형성되어 유리전이온도는 증가하고 복합재의 특성을 미치는 물리시효가 발생하여 엔탈피를 완화시키는 흡열피크가 관찰된다고 하였다. 또한 FTIR 시험을 통해 관찰된 피크 위치는 노출시간에 큰 영향을 받지 않지만 피크 세기는 노출

시간이 길어지면 에폭시기에 발생하는 경화반응으로 인해 점차 감소한다고 하였다. Sun 등[4]은 온도와 수분이 탄소섬유/비스말레이미드 복합재의 노화 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 이들에 따르면 접착분리 부위와 계면 상태가 양호하지 않은 미소균열 부위는 수분이 흡수되는 통로 역할을 하며 수분흡수량에 밀접한 영향을 미친다고 하였다. 또한 층간전단강도는 노출시간이 길어지면 저하되다가 일정한 값에 수렴하며 저하 정도는 노출온도가 높을수록 커진다고 하였다. Guermazi 등[5]은 항공기 구조재의 보수를 위한 데이터베이스 구축을 위해 온도와 습도가 유리섬유/에폭시 복합재와 탄소섬유/에폭시 복합재의 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 이들에 따르면 온도와 수분은 수지 가소화를 유발시키며 환경인자에 장기간 노출되면 복합재의 내구성은 저하된다고 하였다. 또한 시간-온도 중첩법을 이용하면 온도와 수분의 노출과 기계적 특성과의 관계를 얻을 수 있다고 하였다. Barbosa 등[6]은 온도, 수분, 자외선 조절이 가능한 환경챔버를 이용하여 환경인자가 탄소섬유/에폭시 복합재의 내구성에 미치는 영향을 조사하였다. 이들에 따르면 가속 노화된 복합재의 기계적 특성은 크게 저하되지 않더라도 무게 손실, 섬유 노출, 화학적 변화, 균열밀도 증가, 섬유 좌굴 등이 현저히 관찰된다고 하였다. 이와 같은 탄소섬유/에폭시 복합재는 우주항공, 자동차, 선박, 무기체계 등에 널리 적용되고 있지만 신뢰성을 향상시키고 응용 분야를 확대시키기 위해서는 복합재 자체의 취약 부위에 대한 정량적인 특성 평가와 환경인자 영향을 고려한 장기 성능 예측에 대한 연구가 필수적으로 수행되어야 한다.

본 연구에서는 환경인자에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재의 층간전단강도를 평가하고 환경인자에 장기간 노출되는 경우 탄소섬유/에폭시 복합재의 층간전단강도를 예측하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 필라멘트와 와인딩 공법을 적용하여 층간전단시편을 제작하여 분위기 온도를 달리한 건조 조건과 침수 조건에 최대 3000시간까지 노출시킨 후 층간전단시험을 수행하였다. 또한 환경인자에 노출된 시편들에 대해 평가된 결과를 수명-온도 관계식에 적용하여 장기간 노출된 후의 층간전단강도를 예측하였다.

2. 시편 제작 및 시험 방법

2.1 시편제작

환경인자에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재의 층간전단강도를 예측하기 위해 층간전단시편을 제작하였다. 층간전단시편은 에폭시(Epon826, Hexion, USA)에 함침된 탄소섬유(T700-12K, Toray, Japan)를 원하는 적층패턴을 갖도록 맨드렐에 와인딩한 다음 오븐에서 85°C에서 6시간, 150°C에서 6시간의 경화조건을 적용하여 성형하였다. 적층패턴은 $\pm 40^\circ$ 와 90° 로 구성되어 있고 공칭 두께는 5 mm이다.

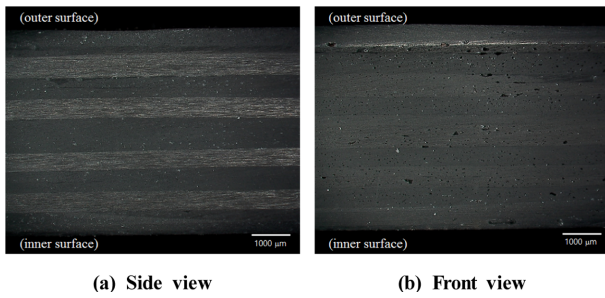


Fig. 1. Cross sectional views of interlaminar shear test specimen

Fig. 1에는 층간전단시편의 두께 방향을 따라 관찰한 적층단면의 사진들이 나타나 있다. 여기에서 보면 층간전단시편을 제작할 때 수지에 함침된 탄소섬유는 초기장력을 가하여 맨드릴에 와인딩하였으며 최외층에는 수축 테이프를 감은 다음 오븐에서 성형하였기 때문에 복합재의 외면에는 과잉 수지층이 거의 생기지 않는다. 제작된 층간전단시편의 구성재 함유율을 미국표준시험규격[7-10]에 근거하여 측정하면 섬유부피함유율이 59.90%, 수지부피함유율이 35.83%, 기공함유율이 4.27%로 나타났으며 적층단면의 사진으로 판단하면 비교적 많은 기공이 존재하고 있음을 알 수 있다.

2.2 환경시험

Fig. 2에는 층간전단시편에 환경인자를 노출시키기 위한 시험장치가 나타나 있다. 층간전단시편은 분위기 온도가 50°C, 70°C, 100°C로 설정된 각 오븐에 넣고 규정된 시간 동안 노출시키는 건조 조건과 준비된 시편을 증류수가 채워진 수조에 넣고 분위기 온도가 25°C, 50°C, 70°C로 설정된 각 오븐에서 규정된 시간 동안 노출시키는 침수 조건을 적용하였다. 이때 노출시간은 최대 3000시간이며 노출주기는

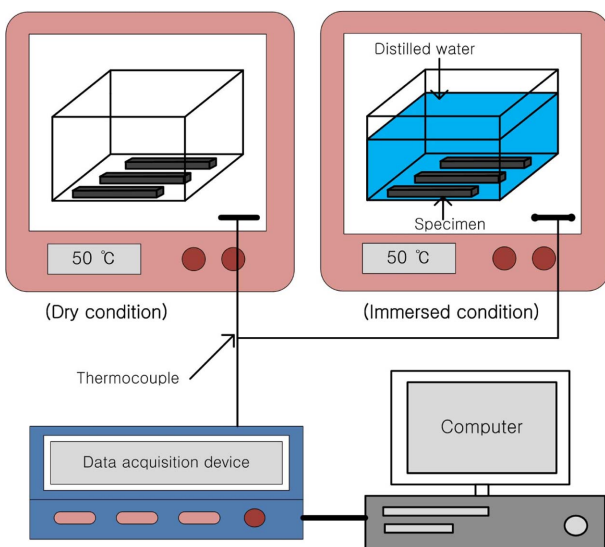


Fig. 2. Configuration of environmental test equipments

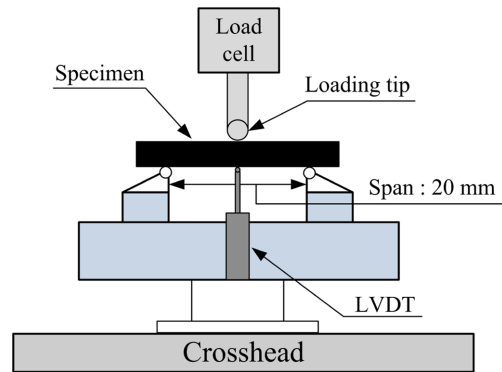


Fig. 3. Overview of interlaminar shear strength test

0시간, 100시간, 250시간, 500시간, 1000시간, 2000시간, 3000시간을 고려하였다.

2.3 층간전단시험

Fig. 3에는 환경인자에 노출된 층간전단시편의 층간전단강도를 평가하기 위한 시험장치가 나타나 있다. 층간전단시편은 35 mm × 10 mm × 5 mm이며 시험은 ASTM D2344에 근거하여 수행하였다[11]. 하중시험기(Z100, Zwick, Germany)에 설치된 굽힘시험치구에 층간전단시편을 스패인 20 mm가 되도록 장착한 다음 시편중앙부에 1.0 mm/min의 변위제어 상태로 하중을 가하였다. 시편의 개수는 각 분위기 조건에 대해 노출시간 별로 7개씩을 시험하였으며 층간전단강도는 식 (1)에 의해 평가하였다.

$$S = \frac{3P_f}{4bh} \quad (1)$$

이때 P_f 는 파단하중, b 와 h 는 시편의 폭과 두께이다.

3. 장기 성능 예측

탄소섬유/에폭시 복합재는 환경인자에 장기간 노출되면 물리적 특성과 기계적 특성이 변하기 때문에 환경인자의 영향을 고려한 내구성 평가와 장기 성능 예측이 필요하다. 환경인자에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재의 반응속도 $V(T)$ 와 수명 $L(T)$ 는 각각 식 (2)와 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

$$L(T) = C \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (3)$$

이때 A 는 전지수인자, E_a 는 활성화 에너지, R 은 기체상수, T 는 절대온도, B 와 C 는 모델상수이며 수명 $L(T)$ 는 반응속도 $V(T)$ 의 역수에 비례한다.

식 (3)의 양변에 자연로그를 취하면 식 (4)와 같은 수명-온도 관계식이 얻어진다.

$$\ln[L(T)] = \ln(C) + \frac{B}{T} \quad (4)$$

이때 y 축이 $\ln[L(T)]$, x 축이 $1/T$ 인 선도를 그리면 B 와 $\ln(C)$ 는 각각 선도의 기울기와 절편이다.

4. 결과 및 검토

4.1 층간전단강도 평가

Fig. 4에는 건조 상태에서 분위기 온도에 따라 최대 3000 시간까지 노출시킨 층간전단시편에 대해 측정된 층간전단강도 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 층간전단강도는 노출 전에는 33.28 MPa, 분위기 온도가 50°C에서 1000시간 노출되면 32.71 MPa, 3000시간 노출되면 33.23 MPa, 분위기 온도가 70°C에서 1000시간 노출되면 32.30 MPa, 3000시간 노출되면 34.13 MPa로 노출시간에 따른 층간전단강도의 변화는 크지 않다. 그러나 분위기 온도가 100°C에서 250시간까지 노출되면 층간전단강도가 감소하다가 1000시간 노출되면 33.83 MPa, 2000시간 노출되면 35.27 MPa, 3000시간 노출되면 36.71 MPa로 노출시간이 길어지면 층간전단강도가 다소 증가하는 양상이 나타나며 분위기 온도가 100°C에서 노출 초기에 층간전단강도가 감소하는 양상이 나타난다. 이때 노출 초기에 층간전단강도가 감소하는 양상은 환경 인자에 의한 영향이라기보다는 기공 등의 시편 상태가 시험결과에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 또한 노출시간이 길어지면 층간전단강도가 증가하는 양상이 나타나는데 이는 온도에 의한 후경화 영향 때문으로 판단된다.

Fig. 5에는 침수 상태에서 분위기 온도에 따라 최대 3000 시간까지 노출시킨 층간전단시편에 대해 측정된 층간전단강도 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 층간전단강도는 노출 전에는 33.28 MPa, 분위기 온도가 25°C에서 1000시간 노출되면 33.11 MPa, 2000시간 노출되면 32.71 MPa로 2000

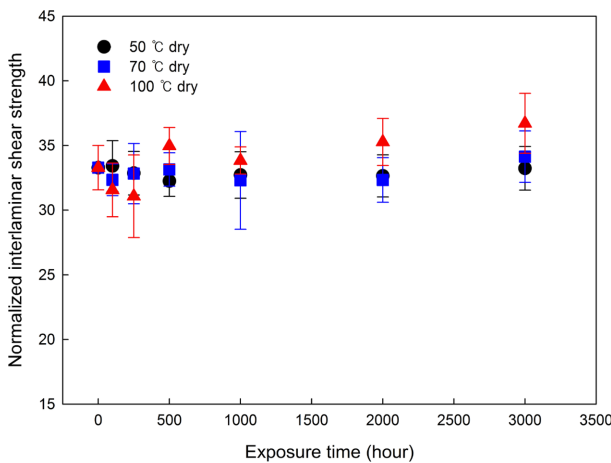


Fig. 4. Variations in interlaminar shear strength for the specimens exposed to dry condition at 50°C, 70°C, and 100°C by varying exposure time

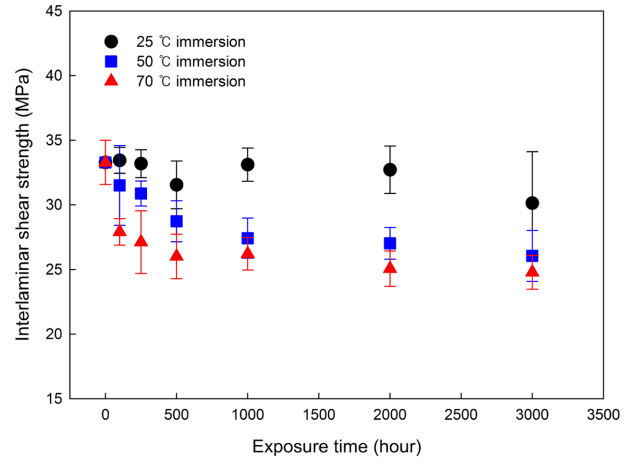


Fig. 5. Variations in interlaminar shear strength for the specimens exposed to immersion condition at 25°C, 50°C, and 70°C by varying exposure time

시간까지 노출되어도 큰 변화가 생기지 않는다. 그러나 3000 시간 노출되면 30.13 MPa로 노출시간이 길어지면 층간전단강도는 감소한다. 또한 분위기 온도가 50°C에서 1000시간 노출되면 27.42 MPa, 3000시간 노출되면 26.05 MPa, 분위기 온도가 70°C에서 1000시간 노출되면 26.21 MPa, 3000시간 노출되면 24.78 MPa로 노출시간이 길어지면 층간전단강도는 점차 감소한다. 이와 같이 층간전단강도는 노출시간이 길어지면 점차 감소하며 분위기 온도가 높아지면 감소 정도도 현저하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6에는 분위기 온도가 각각 50°C와 70°C에서 최대 3000 시간까지 건조 상태와 침수 상태에 노출시킨 층간전단시편에 대해 측정된 층간전단강도 변화가 비교되어 나타나 있다. 여기에서 보면 층간전단강도는 분위기 온도가 50°C에서 1000시간 노출되면 건조 상태에서는 32.71 MPa, 침수 상태에서는 27.42 MPa로 침수 상태에서는 건조 상태에 비

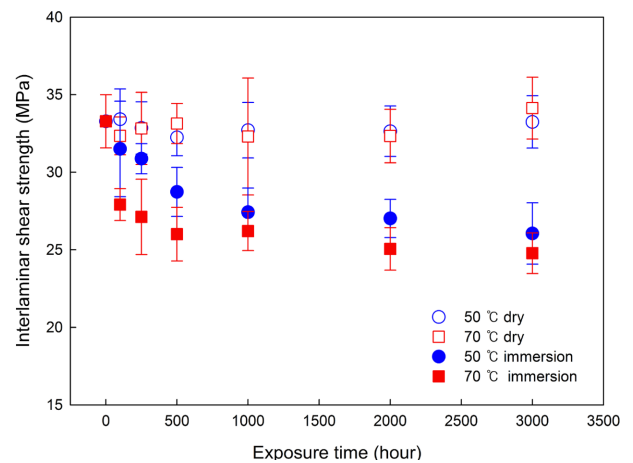


Fig. 6. Comparison of interlaminar shear strength for the specimens exposed to dry and immersion conditions at 50°C and 70°C by varying exposure time

해 16.2% 낮고 3000시간 노출되면 건조 상태에서는 33.23 MPa, 침수 상태에서는 26.05 MPa로 침수 상태에서는 건조 상태에 비해 21.6% 낮다. 분위기 온도가 70°C에서 1000시간 노출되면 건조 상태에서는 32.30 MPa, 침수 상태에서는 26.21 MPa로 침수 상태에서는 건조 상태에 비해 18.9% 낮고 3000 시간 노출되면 건조 상태에서는 34.13 MPa, 침수 상태에서는 24.78 MPa로 침수 상태에서는 건조 상태에 비해 27.4% 낮다. 이와 같이 층간전단강도는 분위기 온도가 동일한 경우 침수 상태에 노출되면 건조 상태에 비해 감소 정도가 커지고 노출시간이 동일한 경우 분위기 온도가 높아지면 분위기 온도가 낮은 경우에 비해 감소 정도가 커짐을 알 수 있다.

4.2 장기 성능 평가

Fig. 7에는 분위기 온도를 달리한 침수 상태에 노출된 층간전단시험편에 대해 측정된 층간전단강도와 각 분위기 온도에서의 층간전단강도 추세선이 나타나 있다. Table 1에는 각 분위기 온도에서의 층간전단강도 추세선인 선형회귀식이 나타나 있다. 여기에서 보면 분위기 온도가 25°C인 경우 추세선의 기울기는 -0.4782, 50°C인 경우 -2.263, 70°C인 경우 -3.275로 분위기 온도가 높아지면 추세선의 기울기는 커진다. 이러한 추세선의 기울기는 층간전단강도 저하 정도와 밀접한 관계가 있으며 추세선의 기울기가 증가하

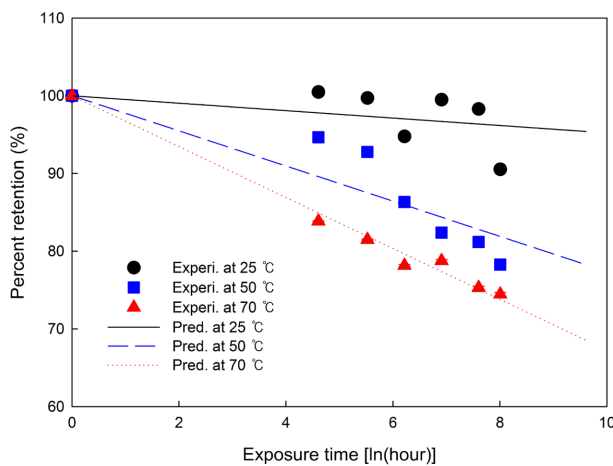


Fig. 7. Interlaminar shear strength and linear regression lines for the specimens exposed to immersion condition at 25°C, 50°C, and 70°C

Table 1. Linear regression equations predicting percent retention of interlaminar shear strength for the specimens exposed to immersion condition at 25°C, 50°C, and 70°C

	Linear regression equation
25°C	$y(t) = 100 - 0.4782 \ln(t)$
50°C	$y(t) = 100 - 2.263 \ln(t)$
70°C	$y(t) = 100 - 3.275 \ln(t)$

(t : hours)

면 층간전단강도 저하 정도가 커진다. 따라서 각 분위기 온도에서의 층간전단강도 추세선인 선형회귀식을 이용하면 환경인자의 노출시간에 따른 층간전단강도의 예측이 가능하다.

Fig. 8에는 Table 1에 나타난 선형회귀식을 이용하여 50000 시간까지의 노출시간을 확장한 경우 예측된 층간전단강도를 노출시간 별로 도시한 선도가 나타나 있다. 여기에서 보면 층간전단강도는 노출시간이 길어지면 감소하고 분위기 온도가 높아지면 감소 정도는 커진다. Table 2에는 각 노출시간에 대해 분위기 온도에 따른 층간전단강도 추세선인 선형회귀식이 나타나 있다. 여기에서 보면 Table 1에서와 마찬가지로 노출시간이 길어지면 추세선의 기울기는 증가하여 층간전단강도 저하 정도가 커진다. 따라서 노출시간에서 대한 층간전단강도 추세선인 선형회귀식을 이용하면 각 분위기 온도에 따른 층간전단강도를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

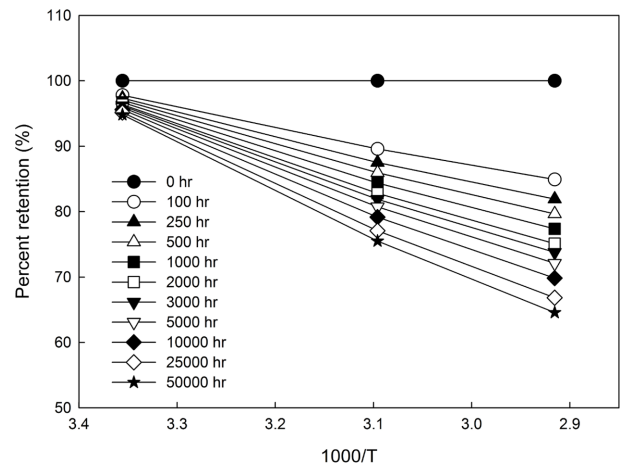


Fig. 8. Predicted lines of interlaminar shear strength for the specimens exposed up to 50000 hour immersion condition

Table 2. Linear regression equations predicting percent retention of interlaminar shear strength for the specimens exposed up to 50000 hour immersion condition

	Linear regression equation
0 hr	$y(T) = 100$
100 hr	$y(T) = -1.104 + 29.42 (1000/T)$
250 hr	$y(T) = -21.22 + 35.28 (1000/T)$
500 hr	$y(T) = -36.44 + 39.71 (1000/T)$
1000 hr	$y(T) = -51.66 + 44.13 (1000/T)$
2000 hr	$y(T) = -66.87 + 48.56 (1000/T)$
3000 hr	$y(T) = -75.78 + 51.15 (1000/T)$
5000 hr	$y(T) = -86.99 + 54.42 (1000/T)$
10000 hr	$y(T) = -102.2 + 58.85 (1000/T)$
25000 hr	$y(T) = -122.3 + 64.70 (1000/T)$
50000 hr	$y(T) = -137.5 + 69.13 (1000/T)$

(T : Kelvin)

Table 3. Comparison of the predicted and experimental percent retentions of interlaminar shear strength for the specimens exposed up to 50000 hour immersion condition

	25°C		50°C		70°C	
	Pred.	Experi.	Pred.	Experi.	Pred.	Experi.
0 hr	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
100 hr	97.6	100.5	90.0	94.6	84.7	83.9
250 hr	97.2	99.7	88.0	92.8	81.6	81.5
500 hr	96.8	94.8	86.5	86.3	79.3	78.2
1000 hr	96.4	99.5	85.0	82.4	77.0	78.8
2000 hr	96.1	98.3	83.5	81.2	74.7	75.3
3000 hr	95.9	90.6	82.6	78.3	73.3	74.4
5000 hr	95.6	-	81.5	-	71.7	-
10000 hr	95.3	-	80.0	-	69.4	-
25000 hr	94.8	-	78.0	-	66.3	-
50000 hr	94.5	-	76.5	-	64.0	-

Table 3에는 각 노출시간에 대해 분위기 온도에 따른 예측된 층간전단강도와 동일한 노출 조건에 대한 측정된 층간전단강도가 비교되어 나타나 있다. 여기에서 보면 층간전단강도는 분위기 온도가 25°C인 경우 노출시간이 2000 시간까지는 측정값의 3.2% 이내, 3000시간에서는 측정값의 5.5% 이내로 예측이 가능하다. 또한 분위기 온도가 50°C인 경우 노출시간이 3000시간까지는 측정값의 5.5% 이내, 분위기 온도가 70°C인 경우 노출시간이 3000시간까지는 측정값의 2.3% 이내로 예측이 가능하다.

식 (5)-식 (7)에는 분위기 온도가 25°C, 50°C, 70°C에서 50000시간까지 노출된 층간전단시편에 대한 층간전단강도 추세선인 선형회귀식이 나타나 있다. 이들 식을 이용하면 각 분위기 온도에 대해 노출시간에 따른 층간전단강도를 예측할 수 있다.

$$\gamma(t) = 99.98 - 51.02\ln(t) \quad \text{at } 25^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$\gamma(t) = 100 - 2.172\ln(t) \quad \text{at } 50^\circ\text{C} \quad (6)$$

$$\gamma(t) = 99.99 - 3.326\ln(t) \quad \text{at } 70^\circ\text{C} \quad (7)$$

5. 결 론

환경인자에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재의 층간전단강도 평가와 장기 층간전단강도 예측을 위한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 분위기 온도가 50°C와 70°C인 건조 상태에 노출되면 층간전단강도는 노출시간에 따라 큰 변화는 없지만 분위기 온도가 100°C인 건조 상태에 노출되면 노출시간이 길어질수록 온도에 의한 후경화로 인해 다소 증가한다. 그러나 분위기 온도가 25°C인 침수 상태에 노출되면 층간전단강

도는 노출 초기에는 큰 변화가 없다가 노출시간이 길어지면 감소하며 감소 정도는 분위기 온도가 높아질수록 커진다.

2) 분위기 온도를 달리한 침수 상태에 노출된 경우의 측정된 층간전단강도를 이용하면 각 분위기 온도에 대한 층간전단강도 추세선인 선형회귀식을 구할 수 있다.

3) 침수 상태에 노출된 경우 노출시간에 따른 층간전단강도는 분위기 온도가 25°C와 50°C인 경우 측정값의 5.5% 이내, 분위기 온도가 70°C인 경우 측정값의 2.3% 이내로 예측이 가능하다.

4) 층간전단강도 추세선인 선형회귀식을 이용하면 환경인자에 장기간 노출된 후의 층간전단강도 및 층간전단강도 저하 정도를 예측할 수 있다.

REFERENCES

1. Taylor, D.M., and Lin, K.Y., "Aging Effects on the Interlaminar Shear Strength of High-Performance Composites," *Journal of Aircraft*, Vol. 40, No. 5, 2003, pp. 971-976.
2. Yoon, S.H., "Evaluation of Durability for Glass Fabric/Phenolic Composites under Salt Water Environment," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 18, No. 4, 2005, pp. 27-33.
3. Hwang, Y.E., Lee, G.H., and Yoon, S.H., "Effect of Combined Environmental Factors on Degradation Behavior of Carbon Fiber/Epoxy Composites," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, No. 5, 2009, pp. 37-42.
4. Sun, P., Zhao, Y., Luo, Y., and Sun, L., "Effect of Temperature and Cyclic Hygrothermal Aging on the Interlaminar Shear Strength of Carbon Fiber/Bismaleimide (BMI) Composite," *Materials & Design*, Vol. 32, 2011, pp. 4341-4347.
5. Goermazi, N., Tarjem, A.B., Ksouri, O., and Ayedi, H.F., "On the durability of FRP Composites for Aircraft Structures in Hygrothermal Conditioning," *Composites Part B*, Vol. 85, 2016, pp. 294-304.
6. Barbosa, A.P.C., Fulco, A.P.P., Gyerra, E.S.S., Arakaki, F.K., Tosatto, M., Costa, M.C.B., and Melo, J.D.D., "Accelerated Aging Effects on Carbon Fiber/Epoxy Composites," *Composites Part B*, Vol. 110, 2017, pp. 298-306.
7. ASTM D 792-08, "Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement," *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, 2008.
8. ASTM D 2584-02, "Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins," *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, 2002.
9. ASTM D 2734-94, "Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics," *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, 2003.
10. ASTM D 3171-09, "Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials," *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, 2009.
11. ASTM D 2344/D 2344M-00, "Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates," *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, 2000.