

장기간 야외노출에 따른 탄소섬유/에폭시 복합재 적층판의 기계적 성능 열화 평가

이우주* · 주민수* · 안교진** · 광병수* · 권진희***†

Assessment of Mechanical Degradation in Carbon Fiber/Epoxy Laminates under Long-Term Outdoor Exposure

Woo-Ju Lee*, Min-Soo Joo*, Kyo-Jin An**, Byeong-Su Kwak*, Jin-Hwe Kweon***†

ABSTRACT: In this study, Carbon fiber/epoxy composites were exposed to the natural outdoor environment of Korea's southern coastal region for eight years to quantitatively evaluate the degradation of their mechanical properties and thermal stability. The specimens were subjected to environmental conditions involving simultaneous exposure to ultraviolet radiation, salt, and precipitation. Annual measurements were conducted to assess moisture absorption, tensile and compressive strengths, in-plane and interlaminar shear strengths, and Glass transition temperature (T_g). Cross-sectional analysis revealed that the surface protection film began to degrade after four years, while the internal Glass barrier remained structurally intact. Moisture absorption increased over the first four years and then gradually declined. Tensile and compressive strengths fluctuated within 5% of their initial values, and shear strengths remained stable within a $\pm 10\%$ range. T_g decreased by approximately 12% compared to unexposed specimens. This study provides empirical data on the long-term environmental degradation behavior of composites under real-world outdoor conditions that are difficult to replicate through single-factor accelerated aging tests.

초 록: 본 연구에서는 탄소섬유/에폭시 복합재를 대한민국 남부 해안의 실외 자연환경에 8년간 장기간 노출시키고, 이에 따른 기계적 특성과 수지의 열적 특성 변화를 정량적으로 분석하였다. 시편은 자외선, 염분, 강우 등 다양한 환경 인자가 동시에 작용하는 조건에 노출하였으며, 매년 보호층의 단면 구조, 흡습량, 인장 및 압축 강도, 면내 및 층간전단 강도, 유리전이온도(Glass transition temperature, T_g)를 측정하였다. 표면 보호층(surface film)은 4차년도부터 점진적으로 열화되었으며, 유리섬유층(Glass barrier)은 구조적 안정성을 유지하였다. 흡습량은 초기 4년간 증가하다가, 이후 감소하는 경향을 보였다. 인장 및 압축 강도는 기준값 대비 5% 이내에서, 전단 강도는 $\pm 10\%$ 범위 내로 측정되었다. T_g는 기준년도 대비 12% 감소하였다. 본 연구를 통해 단일 인자 기반의 가속화 시험으로는 구현하기 어려운 장시간 실외 자연환경 조건에서 복합재료의 열화 거동을 실측 데이터로 제시할 수 있었다.

Key Words: 자연환경 노출(Natural environmental exposure), 장기 열화(Long-term degradation), 탄소섬유/에폭시 복합재(Carbon fiber/epoxy composites), 기계적 특성(Mechanical properties)

Received 22 July 2025, received in revised form 5 August 2025, accepted 21 August 2025

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

**Korea Aerospace Industries, Ltd.

***†Gyeongsang National University, Corresponding author (E-mail: jhkweon@gnu.ac.kr)

1. 서 론

탄소/에폭시 복합재(Carbon/epoxy composites)는 높은 비강도 및 비강성, 우수한 내식성과 피로 저항성을 바탕으로 항공우주 구조물에서 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 복합재는 장기간 자연환경에 노출될 경우 자외선, 수분, 염분, 온도 변화 등 다양한 열화 인자의 복합적 작용에 의해 기계적 강도 저하와 섬유-수지 계면의 손상이 발생할 수 있다[1,2]. 이러한 특성 변화는 단순한 물성 저하를 넘어 구조물의 운용 신뢰성 저하 및 잔존 수명 단축을 유발하는 주요 인자로 작용한다.

복합재 열화는 크게 세 가지 메커니즘으로 구분된다. 첫째, 수분 흡수에 따른 수지의 연화(plasticization) 및 계면분리(debonding)는 유리전이온도(Glass transition temperature, Tg)의 저하 및 층간전단 강도(interlaminar shear strength, ILSS)의 감소로 이어진다[3]. 둘째, 자외선은 에폭시 수지의 고분자 사슬을 절단하여 분자량 감소 및 표면 균열을 유도하며, 이로 인해 표면 취화 및 기계적 특성 저하가 발생한다[4]. 셋째, 염분은 염소 이온(Cl⁻)을 통해 섬유-수지 계면의 결합력을 약화시키고 장기적으로 전단 및 피로 특성에 부정적인 영향을 미친다[5].

따라서 환경인자에 따른 복합재 구조의 물성 열화를 정량적으로 평가하는 것은 구조 신뢰성 확보 및 수명 예측을 위해 필수적이며 자외선[6-9], 수분[10-12], 염분[13-17], 온도 변화[18,19] 등의 인자에 대한 기계적 성능 변화 연구가 활발히 이루어지고 있다. 자외선에 대한 연구로는 Awaja 등[6]이 X-ray CT를 이용하여 자외선에 의해 열화된 복합재 내부 손상을 정량적으로 분석하였으며, Hwang 등[7]은 온도, 습도, 자외선이 복합적으로 작용하는 가속노화 시험을 통해 수지의 망상구조 형성과 Tg의 상승을 관찰하였다. Kumar 등[8]은 자외선과 흡습 환경을 교차 적용한 조건에서 적층 방향에 따른 물성 저하를 비교한 결과, 90° 적층 복합재에서 기계적 특성 및 강도의 저하가 뚜렷하게 나타남을 보였다. Shi와 Zhongmeng[9]도 자외선 노화에 따른 기계적 성능 저하를 실험적으로 확인하였다. 수분의 영향에 대해 Kim과 Moon[10]은 장시간 수분흡수가 유리섬유/에폭시 복합재의 계면 접착력 저하 및 경계면 박리를 초래함을 보였으며, Loos와 Springer[11]는 수분 흡수 거동이 환경 조건에 따라 상이하고, 확산 계수와 포화 흡수량에 영향을 받는다고 분석하였다. Judd 등[12]은 수분 확산이 시간에 따라 선형적으로 증가하며 복합재의 기계적 특성에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 염분 환경에서는 Yoon과 Hwang[13]이 염수 노출에 따른 복합재의 기계적 성능 저하 및 Tg 감소를 정량적으로 제시하였으며, Alaattin 등[14]은 장기간 해양 환경 노출로 인한 복합재의 연화와 파손 범위 증가를 확인하였다. Visco와 Campo[15]는 담수 노출 조건에서 Vinyl Ester 수지가 Isophthalic Polyester보다 우수한 내수성과 기계적 안

정성을 제공함을 확인하였으며, Silva 등[16]은 염수, 담수, 결빙-해동, 흡습-건조 반복 등 다양한 환경 조건이 복합재 기지 특성에 미치는 영향을 비교하였다. Mourad 등[17]은 해수와 고온 환경에 노출된 유리/에폭시 복합재의 기계적 성능 열화를 보고하였다. 온도 변화와 관련하여 Khan 등[18]은 성형 공정 차이에 따른 탄소/에폭시 복합재의 흡습 노화 및 고온 노출 시 Tg와 층간전단 강도 감소 특성을 평가하였으며, Choi 등[19]은 고온다습 환경에서의 장기간 노출이 복합재의 열적-기계적 성능을 유의미하게 저하시킴을 보고하였다.

그러나 공개된 대부분의 연구는 단일 환경 인자에 기반한 시험에 집중되어 있으며, 실제 자연환경에서 복합적으로 작용하는 다양한 열화 인자 간의 영향을 충분히 반영하지 못하는 한계를 지닌다. 자연환경에 장기간 복합재 구조물을 노출시키고 그에 따른 기계적 성능 변화를 정량적으로 평가한 연구는 제한적이다.

본 연구에서는 자외선, 수분, 염분, 온도 변화 등이 복합적으로 작용하는 실외 자연환경에 탄소/에폭시 복합재 구조를 8년간 노출시켰다. 이후 매년 동일한 시점에 보호층의 단면 구조를 관찰하고, 수분함량, 인장 강도, 오픈홀(open-hole) 압축 강도, 면내 및 층간전단 강도, Tg 등을 측정하여 복합재 구조설계를 위한 자료를 제공한다.

2. 복합재 구조 제작 및 노출환경 조성

2.1 시편 제작

총 8년간의 단면 구조 관찰, 인장, 오픈홀 압축, 면내전단, 층간전단 강도와 Tg 측정을 위한 총 여섯 종류의 패널을 제작하였다. 모든 패널은 Table 1에 제시된 적층 순서에 따라 Hexcel社의 IM7 프리프레그를 손으로 적층하였다. 적층판 상부에는 추가로 유리섬유층(Glass barrier)과 표면필름(surface film)을 적층하였다. 유리섬유층은 복합재 내부로의 수분 및 오염원 침투를 차단하고 장기간 자연환경 노출 시 계면 보호를 위해 사용하였고 표면필름은 외부 환경에 대한 1차 방어층 역할을 수행한다.

오토클레이브 성형을 위한 적층 방법은 Fig. 1과 같다. 실외 자연환경에 노출하기 전, Fig. 2와 같이 모든 시편의 가

Table 1. Stacking sequences for specimens

Tests	Stacking sequence
Cross-sectional microstructure	[45/0/-45/90] _{2S}
No-hole tensile	[45/0/-45/90] _{2S}
Open-hole compressive	[45/0/-45/90] _{2S}
In-plane shear	[0/90] _{6S}
Interlaminar shear	[0] ₁₈
Glass transition temperature	[0] ₁₈

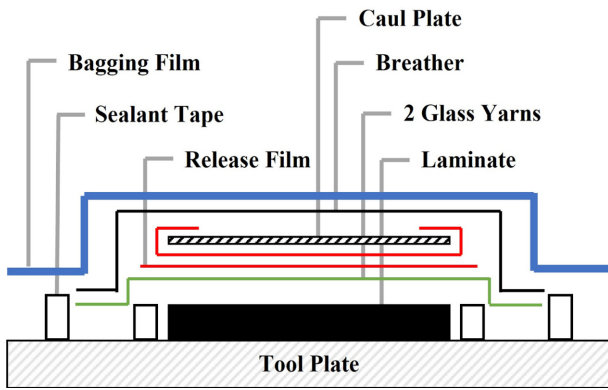


Fig. 1. Schematic of the vacuum bag set-up

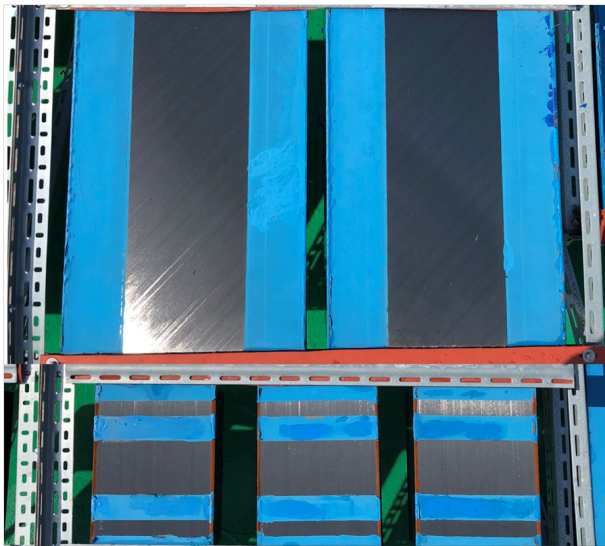


Fig. 2. Composite panels for natural environment exposure

장자리와 인장시편의 탭 부착 부위는 실링 테이프로 밀봉하였다. 면단전단 시편의 경우 노치부를 제외한 모든 면을 밀봉하였다.

2.2 자연환경 노출 조건

시편은 2017년부터 2024년까지 8년간 해안과 100 m 이내 인접한 곳에 설치된 실외 시험소에서 자연환경에 노출시켰다. 해안과 인접한 위치로 인해 고온다습한 해양성 기후의 영향을 지속적으로 받는 지역이며, 시편에는 자외선, 고습도, 강우, 해풍 등 복합적인 환경 인자가 동시에 작용한다. Fig. 3에 제시된 패널 거치용 구조물은 지붕과 측면 차폐가 없는 개방형 구조로 설계되어 바람, 자외선, 습도, 염분 등 외부 인자에 시편이 직접 노출될 수 있는 환경을 제공한다. 또한 시편 고정부에는 갈바닉(galvanic) 부식을 위해 실리콘 코팅을 적용하였고 빗물이나 세척수가 패널 표면에 고이지 않도록 경사진 지지 구조를 설계하였다.

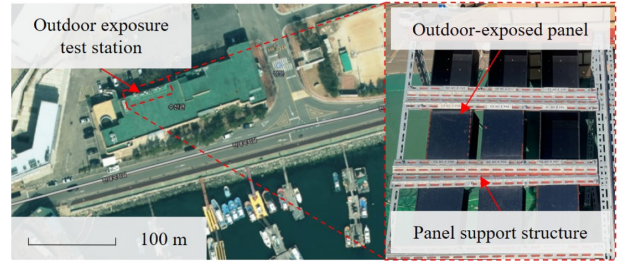


Fig. 3. Natural environment exposure set-up

3. 자연환경 측정 및 기계적 성능 평가

3.1 자연환경 측정

자연환경 노출 조건의 정량적 분석을 위해 기상청 통계 자료와 현장에 설치된 측정 장비를 활용하여 환경 데이터를 수집하였다. 온도, 습도, 풍속, 강우량은 시편 위치로부터 약 3 km 떨어진 통영기상대의 데이터를 사용하였고 자외선 및 비레염분은 현장에 설치된 장비를 통해 측정하였다. 측정 항목, 주기 및 방법은 Table 2에 나타내었다.

3.1.1 자외선 측정

본 연구에서는 자외선 노출 조건을 정량적으로 측정하기 위해 자외선 센서를 사용하였다. 센서는 실리콘 포토다이오드 기반의 광전 효과를 측정 원리로 하며, 230-395 nm 범위의 UVA 및 UVB 영역에 감응한다. UV 센서는 패널과 동일한 위치에 설치하여 동일한 자외선 노출 조건을 유지하였다. 수집된 데이터는 2주 간격으로 회수하였으며 장기적인 데이터 신뢰성 확보를 위해 동일한 주기로 센서의 이상 신호, 감도 저하, 오염 여부 등을 점검하였다.

3.1.2 비레염분 측정방법

비레염분 측정은 ISO9225[20] 기준에 따라 습식 및 건식 두 가지 방식의 시료 채취법을 병행하여 적용하였다. 두 방식 모두 시편과 동일한 높이에 설치하였으며 1개월 간격으로 시료를 회수하여 분석하였다.

습식 방식으로는 습식 양초법(wet candle)을 적용하였으

Table 2. Environmental parameters and measurement methods

Item	Frequency	Recording	Method
Temperature	Hourly	Biweekly	Weather station
Rainfall			
Wind Speed			
Humidity			UV sensor
UV Irradiance	Real-time		
Airborne Salt	Monthly	Monthly	Wet candle / Dry deposition

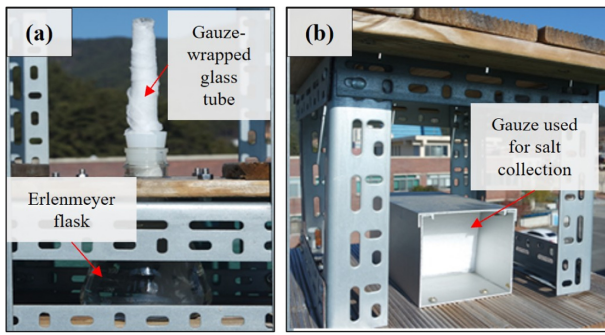


Fig. 4. Salt deposition measurement methods: (a) wet candle method, and (b) dry deposition method

며, 장치 구성은 Fig. 4(a)에 나타내었다.

건식 방식으로는 건식판 방법(K3식 포집 방식)을 적용하였으며, 장치 구성은 Fig. 4(b)에 나타내었다.

3.2 단면 구조 관찰

장기간 자연환경에 노출된 표면필름의 열화 양상을 평가하기 위하여, 연차별로 시편에 대한 단면 구조 관찰을 수행하였다. 각 연차별로 하나의 패널에서 7개의 시편을 가공하여 관찰에 사용하였다.

가공된 시편은 에폭시 수지로 마운팅한 후 연마하여 단면 구조 관찰이 용이하게 하였다. 이후 광학현미경을 사용하여 시편의 단면 구조를 관찰하였으며, 필름의 두께를 측정하여 열화 양상을 정량적으로 평가하였다.

3.3 흡습량 측정

노출된 시편의 흡습량은 ASTM D5229[21] 기준에 따라 건조 전후의 질량 차이를 기반으로 산출하였다. 항온항습챔버를 이용하여 연속된 두 시점 간 질량 변화가 0.01% 이내가 될 때까지 건조시켰다. 질량 측정에는 최소 측정 단위가 1/10000 g인 정밀 저울을 사용하였다.

3.4 물성 시험

장기간 자연환경에 노출된 복합재의 기계적 건전성을 평가하기 위해 적층판 인장, 오픈홀 압축, 면내전단, 층간전단 시험을 수행하였다. 시험은 정적 재료 시험기(INSTRON 5582)를 사용하여 수행하였다. 시험 결과의 신뢰성 확보를 위해 각 시험별로 7개의 시편을 시험하였다.

3.5 Tg 측정

Tg는 ASTM D5229[21] 기준에 따라 건조 완료된 시편을 대상으로 동적 기계 분석기를 이용하여 ASTM D7028[22] 규격을 준용하여 측정하였다. 시편은 해당 규격에 따라 폭 12.00 mm, 길이 56.00 mm, 두께 2.38 mm로 가공하였으며 시험 조건은 승온 속도 5°C/min, 주파수 1Hz, 변형률 0.05%로 설정하였다.

4. 결과 및 토론

4.1 자연환경 측정 결과

8년간의 기후 데이터 측정 결과를 Fig. 5(a)-(g)에 나타내었다. 연평균 기온은 14.5°C, 월간 풍속은 2.41 m/s, 월간 상대습도는 평균 70%, 월평균 강우량은 178 mm로 나타났다. 특히 여름철에는 장마와 태풍의 영향으로 300 mm 이상의 집중 강우가 발생하기도 하였다. 이는 패널이 장기간 고습 환경에 노출되었음을 시사한다.

자외선 조사량은 시편과 동일한 위치에 설치된 센서를 통해 계측하였으며, 월간 평균 누적치는 12.46 MJ/m², 연간 환산치는 150 MJ/m²/year로 복합재 수지의 광열화(photodeterioration)를 유발할 수 있는 임계치를 상회하는 수준이다[7-9]. 비례염분 측정 결과는 습식 양초법 및 K3식 포집방법 모두 유사한 경향을 보였으며 측정값은 각각 0.26-1.10 mg/dm²/day 및 0.31-1.35 mg/dm²/day 범위로 나타났다. 6월부터 8월 사이에는 태풍에 의한 강풍 및 해수 비산 영향으로 일시적으로 염분농도가 증가하는 것으로 판단된다[23]. 통영 지역의 기후 정보는 Table 3에 나타내었다.

4.2 단면 구조 관찰 결과

단면 구조 관찰은 표면필름과 유리섬유층의 잔존 두께 및 구조적 연속성 유지 여부에 초점을 맞추어 수행하였다. 표면필름과 유리섬유층의 두께를 합산한 보호층 전체 두께의 연차별 변화는 Table 4, 대표 단면 이미지는 Fig. 6에 각각 제시하였다. 기준년도 시편에서는 표면필름과 유리섬유층이 각각 약 170 μm, 60 μm의 초기 두께를 유지하고 있었으며, 전체 보호층은 약 232 μm의 두께를 나타내었다.

시간이 경과함에 따라 보호층의 전체 두께는 점진적으로 감소하였으며, 특히 표면필름의 열화가 두드러지게 나타났다. 4차년도부터 감소 경향이 가속화되었으며, 8차년

Table 3. Summary of climatological variations

Climatological Variation	Average	Maximum	Minimum
Temperature of year	14.5°C	35.5°C	-7.0°C
Monthly rainfall	178 mm	642 mm	0 mm
Monthly wind speed	2.41 m/s	3.00 m/s	1.63 m/s
Monthly relative humidity	70%	90%	35%
Monthly irradiance level	12.46 MJ/m ²	25.30 MJ/m ²	0 MJ/m ²
Monthly airborne chlorides (wet candle)	0.61 mg/dm ² /day	1.10 mg/dm ² /day	0.26 mg/dm ² /day
Monthly airborne chlorides (measurement device)	0.65 mg/dm ² /day	1.35 mg/dm ² /day	0.31 mg/dm ² /day

Table 4. Cross-sectional observations

Exposure time (Month/year)	Average thickness (μm)	Variation (%)
Unexposed (standard)	232	-
4 (1st year)	217	-6.5
16 (2nd year)	214	-7.8
28 (3rd year)	207	-10.8
40 (4th year)	173	-25.4
52 (5th year)	171	-26.3
64 (6th year)	148	-36.2
76 (7th year)	147	-36.6
88 (8th year)	115	-50.4

※ Variation(%) = {(Tested value-Control data)/(Control data)} \times 100

도 시편에서는 표면필름이 약 60 μm 수준으로 얇아졌고 전체 보호층 두께는 115 μm 로 초기 두께 대비 약 50.4% 감소하였다. 유리섬유층은 모든 연차에서 약 60 μm 의 두께를 안정적으로 유지하였다. 이는 자체적인 내환경성 외에도, 외측에 위치한 표면필름이 자외선 및 수분 등 외부 인자에 대한 1차 보호층의 역할을 하였기 때문으로 판단된다.

관찰된 모든 시편에서 유리섬유층과 기지 계면 사이의 탈락이나 박리 등 구조적 불연속성은 나타나지 않았으며, 전체적으로 보호층의 계면 구조는 장기간 노출 이후에도 비교적 안정적으로 유지되었다.

4.3 흡습량 측정 결과

장기간 자연환경 노출에 따른 복합재 시편의 흡습 특성은 시험 항목별로 분석하였으며, 각 시험 항목 내에서는 동

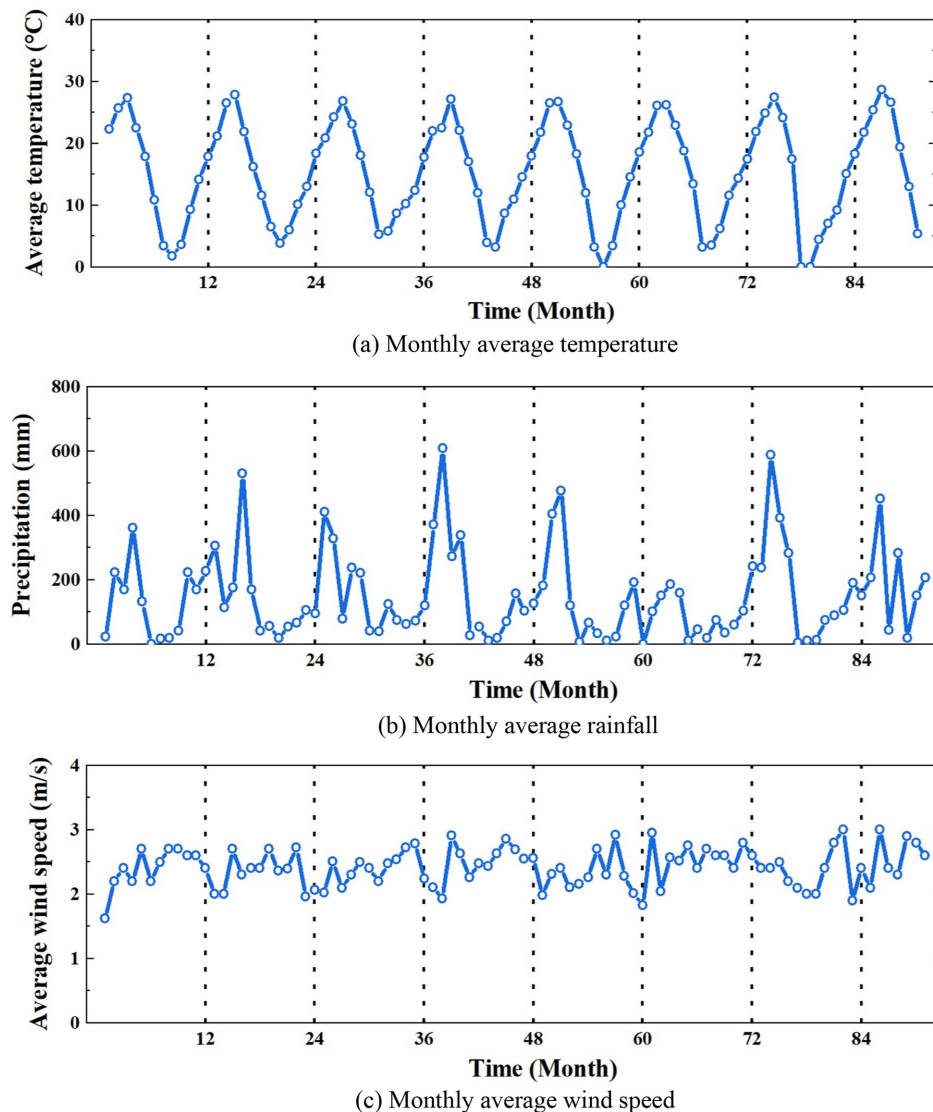
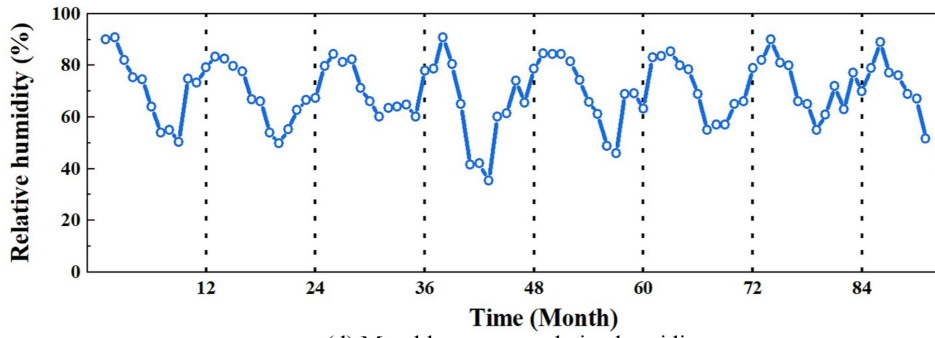
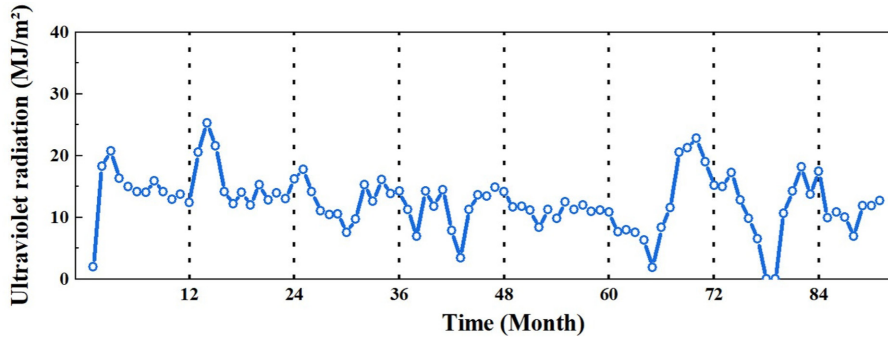


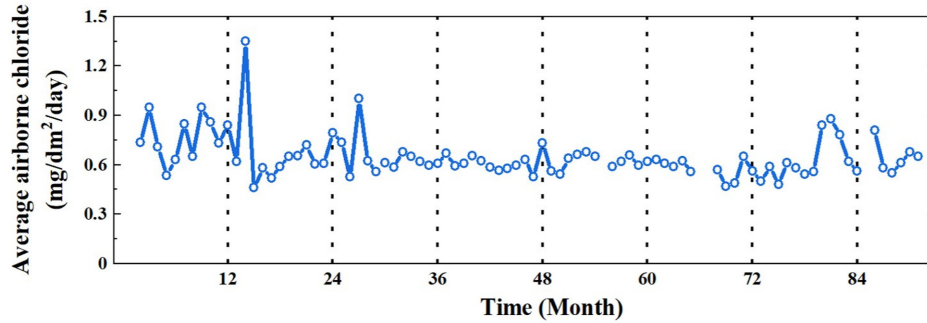
Fig. 5. Monthly recorded environmental conditions: (a) ambient temperature, (b) rainfall, (c) wind speed, (d) relative humidity, (e) ultra-violet radiation, (f) airborne chloride(wet candle method), and (g) airborne chloride(dry plate method)



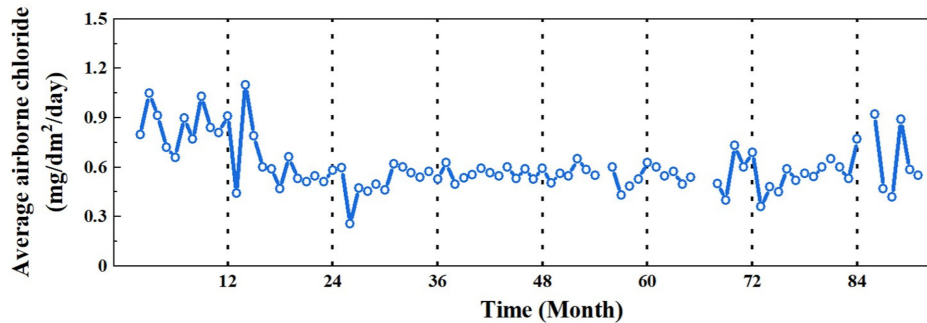
(d) Monthly average relative humidity



(e) Monthly average ultraviolet radiation



(f) Monthly average airborne chloride(wet candle method)



(g) Monthly average airborne chloride(dry plate method)

Fig. 5. Continued

일 연차 내에서 패널 간 흡습량을 비교함으로써 상대적인 수분 흡수 거동을 평가하였다. 시편의 연차별 및 패널별 흡습량 변화는 Fig. 7에 나타내었다. 수분 흡수 거동을 연차별로 분석한 결과, 1차년도부터 4차년도까지는 모든 시편에

서 흡습량이 점진적으로 증가하는 경향을 확인하였다. 4차년도에는 층간전단 패널이 0.8%로 최댓값을 기록하였다. 반면, 5차년도 이후부터는 모든 시편에서 흡습량이 점차 감소하는 경향을 보였으며, 8차년도에는 대부분 0.2-0.3% 수

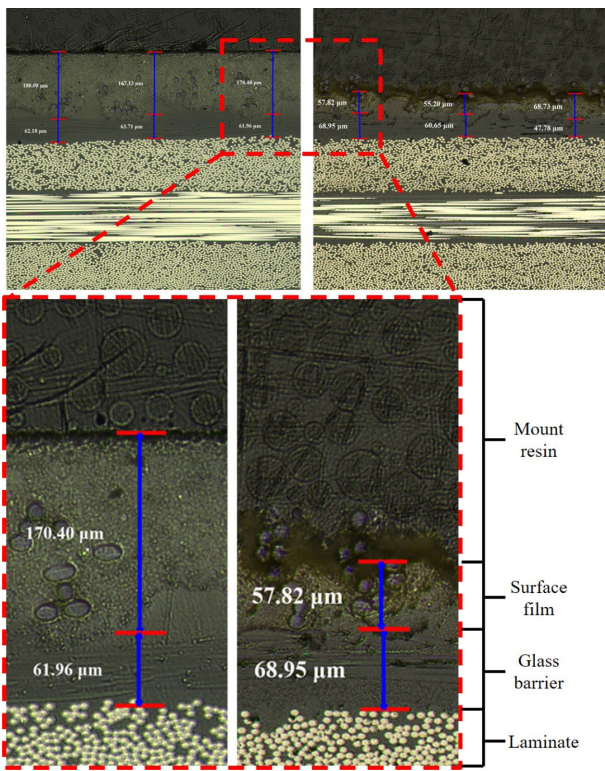


Fig. 6. Cross-sections: (a) baseline specimen, and (b) specimen after 8 years of exposure

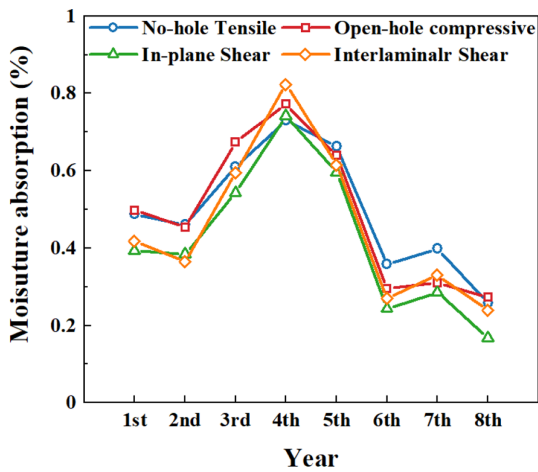


Fig. 7. Cumulative moisture absorption

준까지 저하되었다. 이러한 감소는 자외선에 의한 표면 열화와 반복된 흡습-탈습 사이클에 의해 에폭시 내부에서 발생한 가수분해, 질량 손실, 미세 채널 형성에 따른 탈습 속도의 가속화에 기인한 것으로 해석된다[24].

4.4 기계적 특성 시험 결과

4.4.1 적층판 인장 시험 결과

적층판 인장 시험을 통해 기준년도부터 8차년도까지의

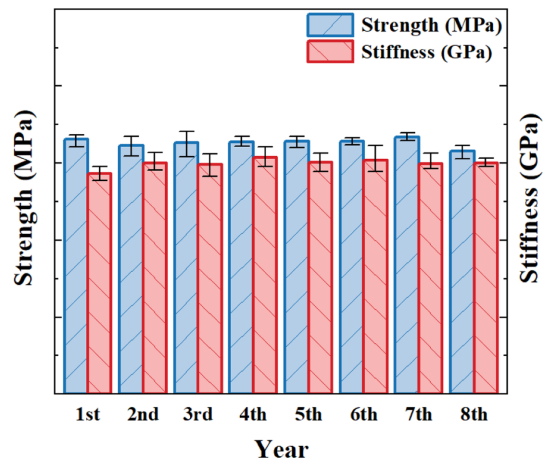


Fig. 8. Tensile strength

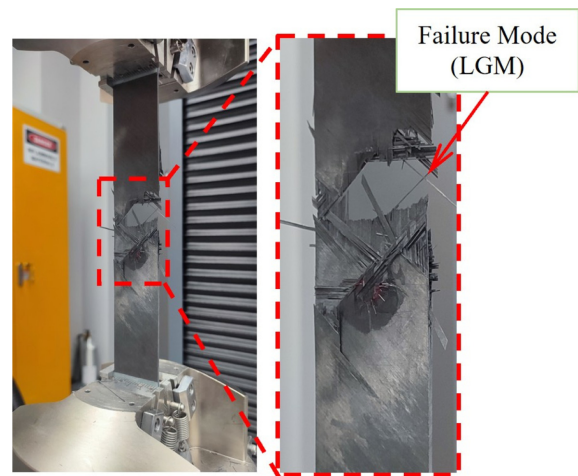


Fig. 9. Failure mode by no-hole tensile test

연차별 기계적 특성 변화를 분석하였다. 시험 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 인장 강도는 기준 연차 대비 $\pm 2\%$ 범위 내에서 7차년도까지 큰 변화가 없었으며, 8차년도에는 약 5% 감소하였다. 인장 강성은 기준 연차 대비 $\pm 3\%$ 범위 내에서 유지되어 통계적으로 유의미한 변화는 관찰되지 않았다. 강도와 강성 모두 장기간 자연환경 노출에도 비교적 안정적인 특성을 나타냈다.

모든 연차 시편에서 유사한 파손 모드가 반복적으로 관찰되었으며, 대표적인 파손 모드는 Fig. 9에 나타내었다. 관찰된 파손 모드는 ASTM D5766[25]에서 정의하는 LGM(lateral gage middle)으로 발생하였으며, 이는 인장 하중에 따른 전형적인 섬유 지배형 인장 파손 모드이다. 이러한 결과는 장기간 자연환경 노출 후에도 복합재의 섬유층이 기계적 건전성을 효과적으로 유지하고 있음을 의미한다.

4.4.2 오픈홀 압축 시험 결과

오픈홀 압축 시험을 통해 기준년도부터 8차년도까지의

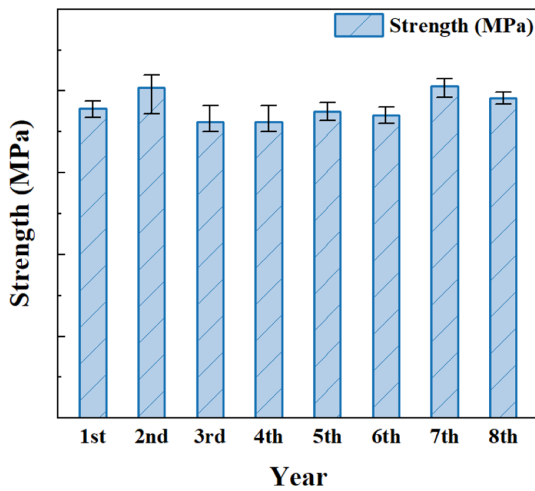


Fig. 10. Open-hole compressive strength

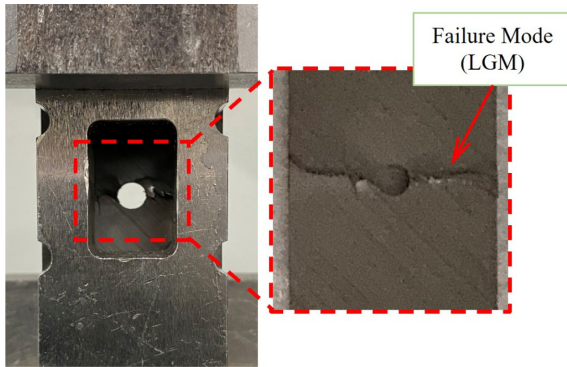


Fig. 11. Failure mode by open-hole compression test

연차별 압축 강도를 비교 분석하였다. 시험 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 압축 강도는 기준 연차 대비 $\pm 5\%$ 범위 내에서 전반적으로 안정적으로 유지되었으며, 3차년도와 4차년도 시편에서는 일시적으로 약 10% 수준까지 감소하였으나 이후 연차에서는 다시 기준년도 수준에 근접한 값을 회복하였다. 연차별 편차는 일부 관찰되었으나, 전반적인 경향을 볼 때 압축 강도는 뚜렷한 열화 경향 없이 비교적 일정한 수준을 유지한 것으로 판단된다.

파손 모드는 Fig. 11과 같이 홀 주변에서 좌굴 또는 압축 파단이 발생하는 전형적인 국부 파손 모드를 보였으며, 이는 ASTM D6484[26] 기준에 따라 분류되는 LGM 파손 모드로 나타났다. 이러한 결과는 장기간 자연환경 노출에도 압축 기계적 성능이 현저히 저하되지 않고 효과적으로 유지되었음을 나타낸다.

4.4.3 면내전단 시험 결과

면내전단 시험을 통해 기준년도부터 8차년도까지의 연차별 기계적 특성 변화를 분석하였다. 시험 결과는 Fig. 12

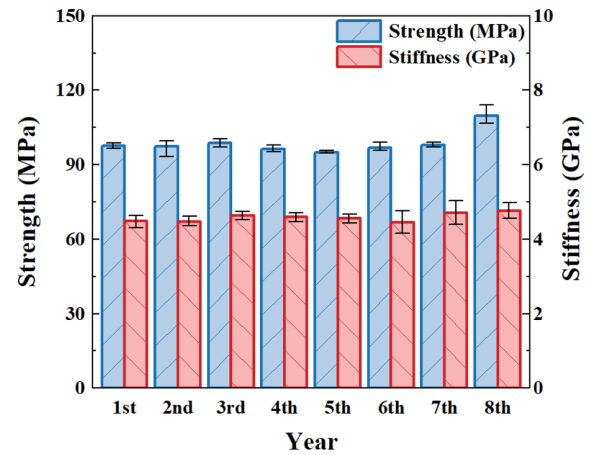


Fig. 12. In-plane shear strength

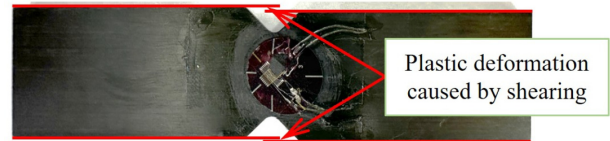


Fig. 13. Failure mode by in-plane shear test

나타내었다. 면내전단 강도는 1차년도부터 7차년도까지 기준 연차 대비 $\pm 2\%$ 범위 내에서 유지되었으며, 8차년도 시편에서는 약 6% 수준으로 증가하였다. 면내전단 강성 또한 기준 연차 대비 $\pm 1\%$ 범위 내에서 유지되었으나 8차년도에서 소폭 증가가 확인되었다. 이러한 결과는 패널 제작 과정에서 발생할 수 있는 기공 형성이나 섬유 배열의 불균일성과 같은 미세 구조적 편차가 기계적 특성에 영향을 미친 것으로 판단된다[27].

파손 모드는 Fig. 13에 나타내었으며, 모든 연차의 시편에서 전단 하중에 의해 발생한 국부적인 소성 변형이 반복적으로 관찰되었다.

4.4.4 층간전단 시험 결과

층간전단 시험을 통해 연차별 전단 강도를 비교 분석하였으며, 결과는 Fig. 14에 나타내었다. 전단 강도는 전체적으로 기준 연차 대비 $\pm 10\%$ 이내의 범위에서 안정적으로 유지되었으며, 8차년도 시편에서는 약 5% 수준으로 증가하였다. 연차 간 뚜렷한 변화는 관찰되지 않았으며, 이는 장기간 자연환경에 노출되었음에도 층간 계면의 접착 특성에 급격한 열화가 발생하지 않았음을 시사한다.

파손 모드는 Fig. 15와 같이 모든 연차의 시편에서 계면을 따라 육안 식별이 가능한 박리 현상이 반복적으로 관찰되었다. 이러한 박리는 전단 하중에 따른 전형적인 파손 모드로 해석되며, 전단 강도에는 유의미한 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

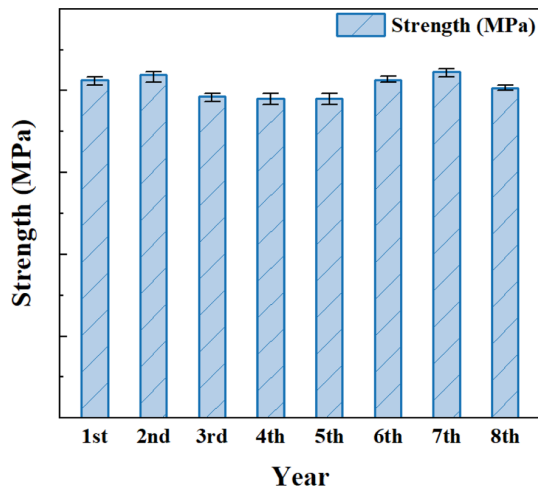


Fig. 14. Interlaminar shear strength



Fig. 15. Failure mode by interlaminar shear test

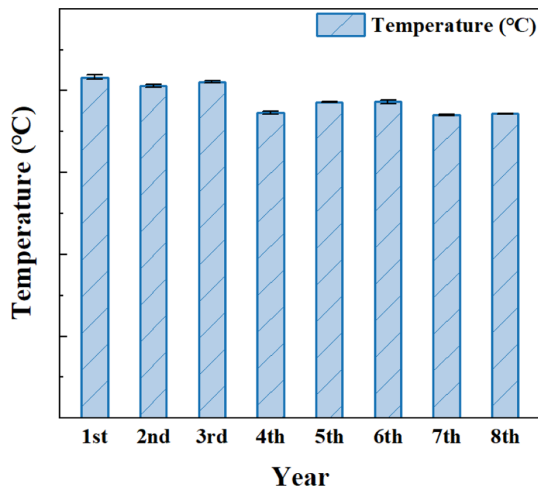


Fig. 16. Glass transition temperature

4.5 Tg 측정 결과

Tg 측정 결과를 통해 연차별 수지의 열적 특성 변화를 분석하였다. 시험 결과는 Fig. 16에 나타내었다. Tg는 1차년도부터 4차년도까지 기준 연차 대비 약 -4% 내외 범위에서 안정적으로 유지되었으나, 4차년도 이후부터는 지속적인 감소 경향이 나타났다. 특히 4차년도부터 7차년도까지는

기준 연차 대비 약 8-12% 수준으로 감소하였으며, 8차년도 시편에서도 약 12% 감소가 확인되었다. Tg의 이와 같은 감소는 수지 기지 내 분자 사슬의 절단, 가교 밀도 감소, 수분 흡수에 의한 가소화 효과 등과 관련된 열화 반응의 진행을 반영하는 것으로 해석된다[28]. 이러한 결과는 장기간 자연환경 노출에 따른 수지의 화학적 열화가 누적적으로 발생하였음을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 탄소섬유/에폭시 복합재를 대한민국 남부 해안의 실외 자연환경에 8년간 장기간 노출시킨 후 단면 구조, 흡습 특성, 기계적 특성 및 열적 특성의 변화를 정량적으로 평가하였다. 시편은 자외선, 강우, 염분 등 다양한 환경 인자가 복합적으로 작용하는 조건에 배치되었으며, 연차별 물성 비교를 통해 열화 거동을 체계적으로 평가하였다.

단면 구조 관찰 결과, 가장 외부에 위치한 보호층인 표면 필름은 4차년도부터 점진적인 열화가 시작되어, 초기 두께 약 170 μm 에서 8차년도에는 약 60 μm 수준까지 감소하였다. 반면, 중간 층인 유리섬유층은 8년간의 노출 기간 동안 구조적 손상 없이 약 60 μm 의 두께를 안정적으로 유지되었다.

흡습량은 노출 초기(1-4차년)에는 증가하였으나, 5차년도 이후에는 감소하는 경향이 나타났다. 이는 수지의 구조적 변화 및 확산 경로의 변화로 기인한 것으로 해석된다. 이와 같은 흡습 변화에 따라 기계적 특성은 일정 수준에서 안정화되었고 인장 및 압축 강도는 최대 5% 이내, 면전단 및 층간전단 강도는 $\pm 10\%$ 범위에서 유지되었다.

열적 특성 측면에서는 Tg가 기준년도 대비 약 12% 감소하였다. 이는 분자 사슬 절단 및 가교 밀도 저하에 따른 수지 열화에 기인한 것으로 판단되며, 고온 환경에서의 성능 저하 가능성을 시사한다.

본 연구에서는 항공기의 실제 운용 환경과 유사한 조건에서 장기간 노출된 복합재의 내환경 내구성을 실험적으로 입증하였다. 본 연구의 결과는 향후 항공우주 및 해양 복합재 구조물의 설계시에 중요한 참고자료가 될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2025년도 경상국립대학교 글로벌대학30사업과 한국항공우주산업의 “장기간 자연환경 및 운용환경 노출에 따른 재료 내구성 평가 연구(2016-1027)” 과제의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Lee, H. G., Kwon, H., Park, S. Y., and Choi, W. J., “Property

- Evaluation of Aerospace-grade Composite Laminate subjected to Moisture Absorption Environments,” *Proceeding of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2011, pp. 821-826.
2. Choi, H. S., Ahn, K. J., Nam, J. D., and Chun, H. J., “Hygroscopic Aspects of Epoxy/Carbon Fiber Composite Laminates in Aircraft Environments,” *Composites Part A*, Vol. 32, No. 5, 2001, pp. 709-720.
 3. Blikstad, M., Sjöblom, P. O. W., and Johannesson, T. R., “Long-Term Moisture Absorption in Graphite/Epoxy Angle-Ply Laminates,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, No. 1, 1984, pp. 32-46.
 4. Gibbins, M. N., and Hoffman, D. J., “Environmental Exposure Effects on Composite Materials for Commercial Aircraft,” No. D651227, 1982.
 5. Vodicka, R., “Accelerated Environmental Testing of Composite Materials,” No. DSTOTR0657, 1998.
 6. Awaja, F., Nguyen, M. T., Zhang, S., and Arhatari, B., “The Investigation of Inner Structural Damage of UV and Heat Degraded Polymer Composites Using X-ray Micro CT,” *Composites Part A*, Vol. 42, 2011, pp. 408-418.
 7. Hwand, Y. E., Lee, G. H., and Yoon, S. H., “Effect of Combined Environmental Factors on Degradation Behavior of Carbon Fiber/Epoxy Composites,” *Composites Research*, Vol. 22, No. 5, 2009, pp. 37-42.
 8. Kumar, B. G., Singh, R. P., and Nakamura, T., “Degradation of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensation,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 28, No. 24, 2002, pp. 2713-2733.
 9. Shi, Z., Zou, C., Zhou, F., and Zhao, J., “Analysis of the Mechanical Properties and Damage Mechanism of Carbon Fiber/Epoxy Composites under UV Aging,” *Materials*, Vol. 15, No. 8, 2022, Article 2919.
 10. Kim, J. H., and Moon, C. K., “Effect of Long-Term Water Absorption on the Interfacial Properties of E-Glass Fiber/Epoxy Resin,” *Pollimo*, Vol. 22, No. 3, 1998, pp. 468-477.
 11. Loos, A. C., and Springer, G. S., “Moisture Absorption of Graphite-Epoxy Composites Immersed in Liquids and in Humid Air,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 13, No. 2, 1979, pp. 131-147.
 12. Judd, N. C., and Wright, W. W., “Absorption of Water into Carbon Fibre Composites,” *Composite Materials*, Vol. 9, No. 1, 1977, pp. 36-40.
 13. Yoon, S. H., Hwang, Y. E., Kim, J. S., Yoon, H. J., and Kessler, M., “Durability Evaluation of Carbon Fiber/Epoxy Composites for Railway Vehicles Exposed to Saline Environment,” *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 11, No. 4, 2008, pp. 357-363.
 14. Aktas, A., and Uzun, I., “Sea Water Effect on Pinned-Joint Glass Fibre Composite Materials,” *Composite Structures*, Vol. 85, No. 1, 2008, pp. 59-63.
 15. Visco, A. M., Campo, N., and Cianciafara, P., “Comparison of Seawater Absorption Properties of Thermoset Resins Based Composites,” *Composites Part B*, Vol. 42, No. 2, 2011, pp. 123-130.
 16. Silva, P., Fernandes, P., Sena-Cruz, J., Xavier, J., Castro, F., Soares, D., and Carneiro, V., “Effects of Different Environmental Conditions on the Mechanical Characteristics of a Structural Epoxy,” *Composites Part B*, Vol. 88, 2016, pp. 55-63.
 17. Mourad, A. H. I., Abdel-Magid, B. M., El-Maaddawy, T., and Grami, M. E., “Effect of Seawater and Warm Environment on Glass/Epoxy and Glass/Polyurethane Composites,” *Materials & Design*, Vol. 17, No. 5, 2010, pp. 557-573.
 18. Khan, L. A., Nesbitt, A., and Day, R. J., “Hygrothermal Degradation of 977-2A Carbon/Epoxy Composite Laminates Cured in Autoclave and Quickstep,” *Composites Part A*, Vol. 41, 2010, pp. 942-953.
 19. Choi, H. S., Ahn, K. J., Nam, J. D., and Chun, H. J., “Hygroscopic Aspects of Epoxy Carbon Fiber Composite Laminates in Aircraft Environments,” *Composites Part A*, Vol. 32, No. 5, 2001, pp. 709-720.
 20. ISO 9225:2012, “Corrosion of Metals and Alloys — Corrosivity of Atmospheres — Measurement of Environmental Parameters Affecting Corrosivity of Atmospheres.”
 21. ASTM D5229M-20, “Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials.”
 22. ASTM D7028-07 (Reapproved 2024), “Standard Test Method for Glass Transition Temperature of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis.”
 23. Park, G. M., Kim, J. H., Lee, J. S., and Choi, H. Y., “Characteristics of Airborne and Attached Salts on Marine Steel Bridges Considering Service Environments,” *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 34, No. 6, 2022, pp. 373-381.
 24. Gao, C., and Zhou, C., “Moisture Absorption and Cyclic Absorption-Desorption Characters of Fibre-Reinforced Epoxy Composites,” *Journal of Materials Science*, Vol. 54, No. 11, 2019, pp. 8289-8301.
 25. ASTM D5766M-23, “Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates.”
 26. ASTM D6484M-23, “Standard Test Method for Open-Hole Compressive Strength of Polymer Matrix Composite Laminates.”
 27. Korkees, F., “Moisture Absorption Behavior and Diffusion Characteristics of Continuous Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites: A Review,” *Polymer-Plastics Technology and Materials*, Vol. 62, No. 14, 2023, pp. 1789-1822.
 28. Judd, N. C., and Wright, W. W., “Voids and Their Effects on the Mechanical Properties of Composites,” *Journal of Sampe*, Vol. 14, 1978, pp. 10-14.