

論文

냉각(-55℃) 및 고온다습 조건(82.2℃)이 탄소섬유강화 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향 연구

김효진^{*+}, 이시중^{*}, 한상호^{*}, 김상국^{**}, 박성준^{**}

Effect of Cold Temperature Dry and Elevated Temperature Wet on Mechanical Properties of CFRP Composites

Hyojin Kim^{*+}, Sihjoong Lee^{*}, Sangho Han^{*}, Sangkuk Kim^{**}, Seongjun Park^{**}

ABSTRACT

The mechanical behavior of carbon fiber reinforced polymeric (CFRP) composites was investigated. Both strength and modulus were measured at room temperature dry, cold temperature dry, -55℃, and elevated temperature wet, 82.2℃ on seven different laminate configurations consisting of [0₆]_T, [90₁₂]_T, [0₁₆]_T and [90₁₆]_T unidirectional laminates, [±45]_{SS} angle-ply laminate, [0/90₁₂/0]_T cross-ply laminate, a 36-ply laminate [0/45/-45/45/-45/0]_{3S}. Based on the experimental data presented, it is shown that the strength at cold temperature dry, -55℃ is increased with the brittleness of fiber or matrix. Moreover, it is shown that both shear strength and modulus at elevated temperature wet, 82.2℃ are decreased by the cause of interfacial deterioration between fiber and matrix with moisture absorption.

초 록

본 연구에서는 탄소섬유강화 복합재 구조물의 실제 사용조건인 환경에 따른 기계적 특성 연구를 수행하기 위하여, [0₆]_T, [90₁₂]_T, [0₁₆]_T, [90₁₆]_T, [±45]_{SS}, [0/90₁₂/0]_T, [0/45/-45/45/-45/0]_{3S}의 실험을 통해, 복합재의 강도와 강성을 측정 하였다. 실험 결과, 환경조건에서 복합재의 파손 거동을 파악하고 설계관련 데이터베이스를 확보하였다. 저온 건조 조건에서 강도의 증가는 저온(-55℃)에서 섬유 혹은 모재의 취성 증가의 요인으로 분석된다. 고온다습 조건의 전단강도와 전단탄성계수 감소는 침투한 수분에 의해 섬유와 모재의 결합부의 물성이 저하한 것으로 분석된다.

Key Words : 탄소섬유강화 복합재료(carbon fiber reinforced composite), 저온건조(cold temperature dry), 고온다습(elevated temperature wet), 기계적 특성(mechanical properties)

1. 서 론

복합재료는 기존의 등방성 재료에 비해 비강성 및 비강도가 높고 우수한 감쇠특성과 충격 특성으로 인해, 항공기, 우주선, 로봇 팔, 공장 기계 등 다양한 분야에 활용되고 있다[1].

복합재료는 사용되는 환경의 조건에 따라 강도, 탄성계수의 감소와 적층분리, 섬유와 수지의 분리 등 다양한 파손이 일어날 수 있다. 특히 수분과 습기 환경에 노출되는 시간 등에 따라 기계적 성질 및 물성저하가 심각한 수준에 이를 수 있다 [2]. 따라서 탄소섬유강화 복합재료를 실제 구조물에 사용하기

* 한국폴리텍 항공대학

*+ 한국폴리텍 항공대학, 교신저자(E-mail:hjkimprof@gmail.com)

** 한국항공우주산업(주)

위해서는 사용 조건에서의 복합재료 거동에 대한 이해와 설계 관련 데이터베이스 확보가 선행되어야 한다.

저온에서 고온 영역까지 온도가 변함에 따라, 복합재의 기계적 성질 등의 변화가 일어날 수 있다. 따라서 그동안 환경 조건에 따른 복합재의 기계적 물성에 대한 연구가 수행되어 왔다 [3-7]. 김명곤 등[4]은 저온 환경의 연-하중 사이클 인장 실험을 통하여, 섬유 방향의 열팽창계수는 온도가 감소함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이고, 상온으로부터 -50°C 부근까지 시편은 음의 열팽창계수를 값을 갖는 반면에, -100°C와 -150°C 부근에서는 양의 열팽창계수 값을 가짐을 확인하였다. 섬유 수직방향의 열팽창계수는 상온에서 -50°C 부근까지는 약간 증가하다가 다시 저온으로 갈수록 감소하는 경향을 보임을 확인하였다. 김윤희 등[6]은 80°C 수 환경(담수/해수)에서 100~200일 동안 침지 후에 건조한 시편으로 전단강도 실험을 통하여, 125°C 경화용 시편이 177°C 경화용 시편과 비교하여 침지 주기별 전단강도 하락이 월등히 커지는 현상을 보였으며, 이는 중간 전단강도 시험에서 125°C 경화용 시편은 침투한 수분에 의하여 섬유와 모재의 중간 결합부에 영향을 받아 물성이 저하한 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 실제 사용조건인 상온건조(RTD, room temperature dry), 저온건조(CTD, cold temperature dry), 고온다습(ETW, elevated temperature wet) 환경에 따른 기계적 특성 연구를 수행함으로써, 복합재의 설계관련 데이터베이스를 확보하고자 한다.

2. 환경조건에서 기계적 특성 실험

2.1 재료 및 시편

복합재 시편에 사용한 재료는 Cytec사의 Cycom 5276-1 G40-800 24k 프리프레그 테이프이며, 시편은 [0₆]_r, [90₁₂]_r, [0₁₆]_r, [90₁₆]_r, [+45]_{ss}, [0/90₁₂/0]_r, [0/45/-45/45/-45/0]_{ss}로 적층하여 제작하였다.

2.2 환경 노출 실험 조건

시험 환경은 저온, 상온, 고온의 3가지 경우이며, 조건은 다음과 같다.

- 1) 저온건조(CTD, cold temperature dry) : -55°C ± 2.8°C (-67°F ± 5°F), 시험시 안정화 시간으로 정해진 온도에 도달 후 5~6분 안정화 시간을 갖는다.
- 2) 상온건조(RTD, room temperature dry) : 18.3°C (65°F)~23.9°C (75°F), 45~55% RH(relative humidity)
- 3) 고온다습(ETW, elevated temperature wet) : 82.2°C ± 2.8°C (180°F ± 5°F), 시험시 안정화 시간으로 정해진 온도에 도달 후 2~3분 안정화 시간을 가지며 고온 노출 후 5분 이내에 하중을 부가한다. 수조에서 시편을 꺼낸 후 2시간 이내에 시험을 완료한다.

2.3 고온다습 환경 노출 실험

환경 노출 실험은 복합재가 수분 흡수 등으로 인해 강도저하가 발생하는 것을 분석하기 위한 시험으로 ASTM D 5229로 수행하였다. 본 실험에서는 71.1°C ± 1.1°C (160°F ± 2°F) 물속에 시편을 담가 노출시키는 방법을 사용하였다.

복합재가 시간이 경과함에 따라 수분을 흡수하여 포화 상태에 이르렀다고 판단하면, 주어진 환경 조건 하에서 복합재 물성 시험을 수행한다. 포화상태에 대한 판단은 트래블러 쿠폰(traveler coupon)의 중량을 측정하여 다음 조건을 만족하거나 수중에 노출된 지 75 일이 경과하면 조건을 만족한 것으로 하였다.

$$\left| \frac{W_i - W_{i-1}}{W_b} \right| < 0.0001 \quad (1)$$

W_i : 현재 시편 질량

W_{i-1} : 이전 시편 질량

W_b : 초기 시편 질량

위의 조건에 대한 충족성 여부를 판단하는데 있어 약 7일 주기로 트래블러 쿠폰의 중량을 측정하여 기록하게 되며 충분한 수분 흡수가 이루어졌는가를 판단하였다.

중량 측정은 0.1 mg의 정밀도로 계량하였으며, 수조에서 트래블러 쿠폰을 꺼낸 후 중량측정을 완료하고 재 입수되기까지의 시간이 30분 이내가 되도록 함으로써 수조 밖에 있는 동안 수분이 빠져나가는 것을 최소화하였다. 수조 밖에 있는 30분 이내의 시간 중에서도 트래블러 쿠폰이 대기에 완전 노출되는 시간은 5분 이내로 한정하였으며 이 시간에 중량을 측정하였다. 이외의 시간은 따뜻한 물속에 잠겨 있는 상태로 보관하였다. Fig. 1과 2에 보인 바와 같이 두께 1.143 mm 시편의 경우 물속에 넣은 후 약 40일(약 1,000시간)이 경과하면 중량이 일정한 값에 수렴하여 포화상태에 도달하였음을 알 수 있다. 두께 2.286 mm 시편의 경우는 약 75일(1,800 시간)이 경과해야 포화상태에 이르게 된다.

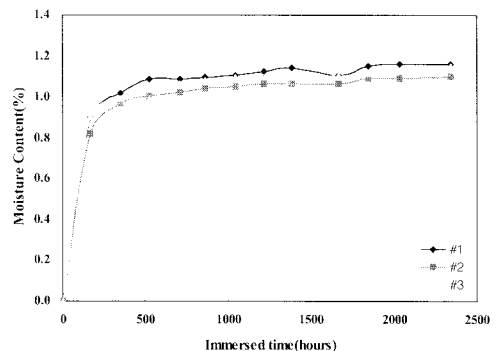


Fig. 1 Water absorption behavior of the specimens with 1.143 mm thickness.

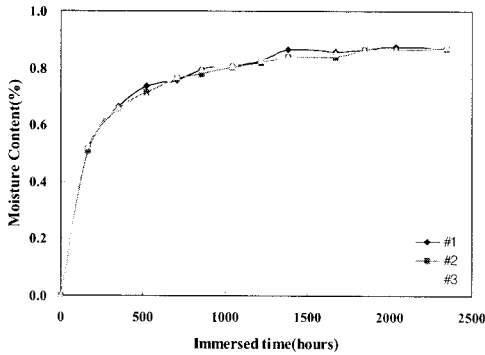


Fig. 2 Water absorption behavior of the specimens with 2.286 mm thickness.

2.4 강도 측정 방법

본 실험에 사용한 시험기는 Instron 8801이며, 변위속도는 1.27 mm/min로 제어하였다. 환경 챔버(environmental chamber)로 저온 실험 장치를 구성하였으며, 챔버는 액체 저온 매체를 기화하여 온도를 낮추는 방식을 사용하는 Instron 3119-409이다. 챔버 안에 그림이 들어가도록 하였으며, 챔버의 온도는 챔버 내에 부착되어 있는 열전대를 통해 제어하여 $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도 오차 범위를 갖는다.

변형률 데이터의 측정 및 저장은 신뢰성이 높고 우수한 하드웨어를 바탕으로 계측의 편의성과 계측 데이터의 효과적인 취득을 위하여 전용 데이터 취득 시스템(data acquisition system)을 개발 적용하였다. 개발환경은 미국 National Instruments사에서 자사 하드웨어 제품의 성능을 향상시키며, 데이터의 신뢰성을 보장하기 위해 개발된 모듈들을 사용하였다. 특히 빠른 시간 내에 사용자가 원하는 소프트웨어를 개발할 수 있도록 지원하는 랩뷰(LabVIEW)를 사용하여 개발하였다. 본 시스템 구성에 있어서 필수 장치인 8채널 유니버설 스트레인 게이지 입력 모듈 SCXI-1520의 각 채널을 통해 입력되는 신호를 실시간으로 동시 취득할 수 있도록 하는 멀티 쓰레딩 기법을 구현하여 시스템을 구축하였다. 데이터의 신뢰성에 대한 검증은 시편에 인장 하중을 가하여 변형률을 측정된 값과 동시에 측정된 연신계(extensometer) 변위로부터 구한 변형률을 비교함으로써 파악할 수 있는데, 그 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

시험 결과의 신뢰성을 제고하기 위해 본격적인 시험에 앞서 시험기의 시스템 얼라인먼트(system alignment)를 확인하는 과정을 거쳤다. 시편 앞면의 가장자리에 2개의 스트레인 게이지, 뒷면 중앙에 1개의 스트레인 게이지를 부착하여 인장시험을 수행하여 얻은 결과로부터 하중 작용선의 불일치로 인한 굽힘 모멘트 성분의 크기를 조사하였다. 굽힘비율(percent bending)은 ASTM D 3039에 서술되어 있는 식을 사용하여 총 굽힘 성분의 크기, B_{total} 이 5% 이내인가를 확인하였다[8]. 본 시험 기간 중에는 총 3회에 걸쳐 수행되었는데 처음에 1

회, 압축 시험 수행 후 인장 시험으로 전환하는 시점에 2회를 실시하였다. 시스템 얼라인먼트 확인 결과 3회 모두 굽힘 성분의 크기가 5% 미만으로 나타나 시험기 상태는 양호함을 확인하였다.

시험은 RTD, CTD, ETW 환경 하에서 각 6개씩 수행하였다. 인장시험은 복합재의 인장시험을 수행하여 인장하중에 대한 제반 물성 데이터를 획득하기 위한 시험으로 ASTM D 3039 방법과 절차로 수행하였다. 압축시험은 ASTM D 3410 방법으로 웨지 그림에서 마찰력의 형태로 전달되는 전단하중이 시편 중심부에 압축하중으로 작용하도록 설계된 치구를 사용하였으며, 좌굴을 방지하기 위해 게이지 길이(gage length)를 짧게 만들어 시험하는 방식으로 치구에 장착하여 실험하였다[9]. $\pm 45^\circ$ 섬유가 적층된 복합재에 인장하중을 가하여 전단하중에 대한 물성치를 측정하는 시험은, 시편에 인장하중을 가하면 섬유방향으로 전단하중이 작용하는 상태가 되도록 하는 방법인 ASTM D 3518로 수행하였다[10]. $[\pm 45]_{ss}$ 적층 시편에 대한 인장시험은 섬유와 모재의 계면전단 강도를 간접적으로 반영할 수 있는 지표로 사용될 수 있다[11]. 3점 굽힘 중간 전단강도 시험은 복합재 적층판의 중간 전단강도를 측정하기 위한 시험으로 ASTM D 2344 방법과 절차로 수행하였다[12]. 시험결과에 대한 통계치는 평균값과 표본에 대한 표준편차, 분산계수(coefficient of variation)를 구하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3과 4는 환경 조건에 따른 $[0]_6$ 적층판의 인장강도와 탄성계수를 측정된 결과이다. 상온에 비해 CTD의 인장강도 8% 증가는 김명곤 등[4]이 확인한 섬유와 모재의 열팽창계수 거동의 특성에 따른 취성 증가의 요인으로 분석된다. 시험 결과 각종 물성치에 대한 분산계수가 5% 미만으로 평균에 근접한 결과를 얻었으며, CTD는 취성 증가로 의해서 인장강도의 변화가 큼을 확인하였다. Fig. 5는 인장시험에서 파손된 양상을 보여주고 있다. ETW 시험의 경우 하중이 증가하면서 탭 접촉 부위가 미끄러지다가 시편으로부터 분리되는 현상이 나타나 올바른 인장강도를 구할 수 없었다. 시편이 고온의 물속에 장시간 잠긴 상태로 보관되면서 접촉부의 강도가 취약해진 것이 원인으로 판단되므로 향후 시험에서는 환경에 적절한 접촉재로 대체되어야 함을 알 수 있다. 탄성계수는 시험환경에 의존하지 않고 RTD, CTD, ETW는 거의 같은 값을 얻었다. 이는 탄성계수의 응력-변형률 관계에서 하중을 담당하는 일방향 섬유의 지배적인 특성에 기인한다.

환경에 의한 모재의 지배적인 물성 변화를 알아보기 위해, $[90]_{12}$ 시편을 이용하여 섬유 수직 방향 물성을 측정하였다. Fig. 6과 7은 섬유방향이 하중과 수직인 시편에 대한 인장강도와 탄성계수를 측정된 결과이다. 전반적으로 파손하중이 시험기 용량의 3% 미만으로 매우 작은 상태여서 시편별로 인장

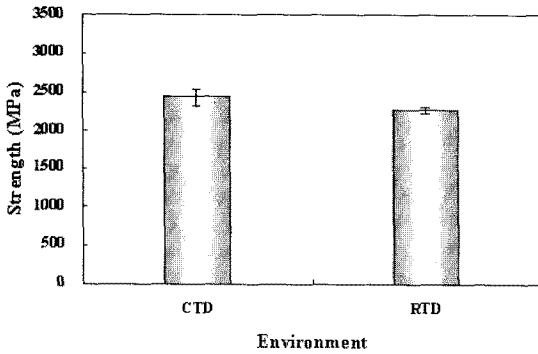


Fig. 3 Tensile strengths of [0₆]r specimens for each condition.

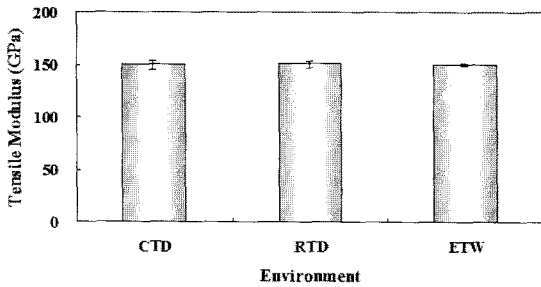


Fig. 4 Tensile modulus of [0₆]r specimens for each condition.

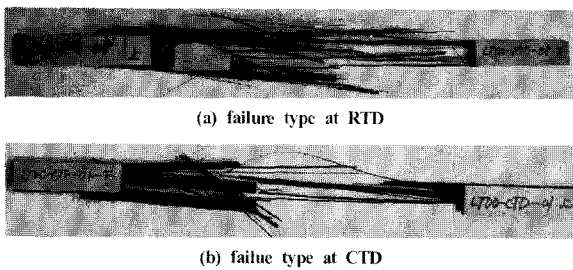


Fig. 5 Photos of tensile failure of [0₆]r specimens for each condition.

강도의 변화가 크게 나타났다. 인장강도의 변화가 시편에 따라 크지만, 탄성계수의 변화는 분산계수가 5% 미만의 결과를 얻었다. 상온에 비해 CTD의 인장강도 11% 증가는 모재의 취성 증가의 요인으로 분석된다. 시편의 파손 양상은 RTD, CTD, ETW 모두 같은 형태를 가지며, Fig. 8은 ETW의 파손된 양상을 보여주고 있다. 파단 형태는 일정한 형태로 나타났으며, 파단 위치는 상, 하부 랩 연결 부위에서 많이 발생했고 중앙에서도 일부 발생하였다. 파단 위치에 따른 강도의 차이는 없음을 확인하였다. ETW의 탄성계수 13% 감소는 모재에 침투한 수분이 물성을 저하시킨 것으로 분석된다.

압축시험은 [90₆]r 적층의 RTD 6개 시편에 대한 시험을 수행하였다. 압축강도와 탄성계수는 197.5 MPa와 8.3 GPa를 얻었다.

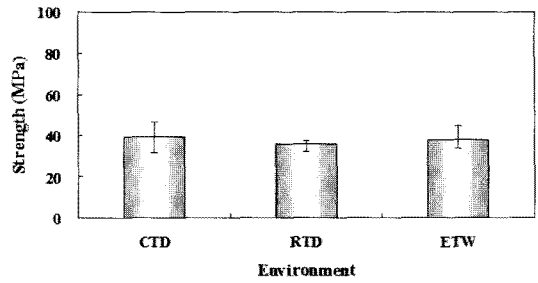


Fig. 6 Tensile strengths of [90₁₂]r specimens for each condition.

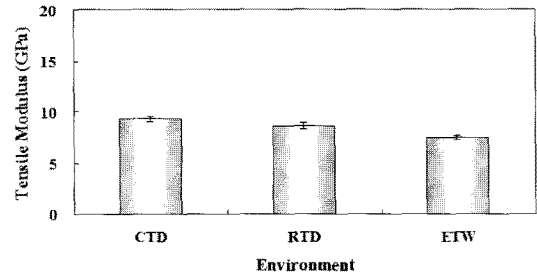


Fig. 7 Tensile modulus of [90₁₂]r specimens by the conditions.

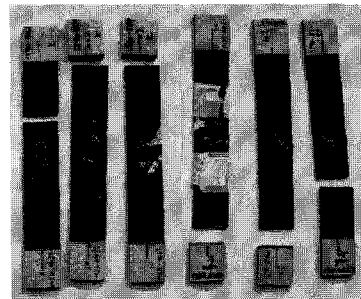


Fig. 8 Photos of tensile failure of [90₁₂]r specimens for ETW.

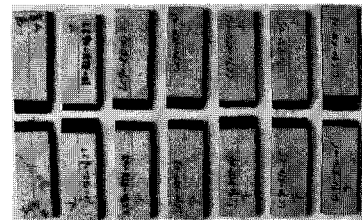


Fig. 9 Photos of compressive failure of [90₆]r specimens for RTD.

RTD의 파손 양상은 Fig. 9에 보인 바와 같다. 하중 작용선의 미소한 불일치로 나타날 수 있는 굽힘 성분의 영향을 알아보기 위하여, 시편의 전면과 후면의 변형률을 측정하였다. Fig. 10에 보인 바와 같이, 압축시험에서 미소한 편심으로 인한 굽힘하중의 영향은 매우 미미한 것으로 확인하였다.

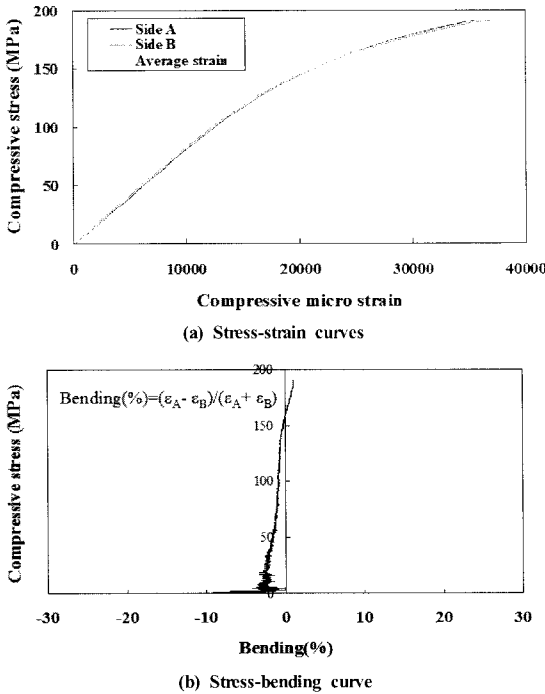


Fig. 10 Bending effect of the compressive test.

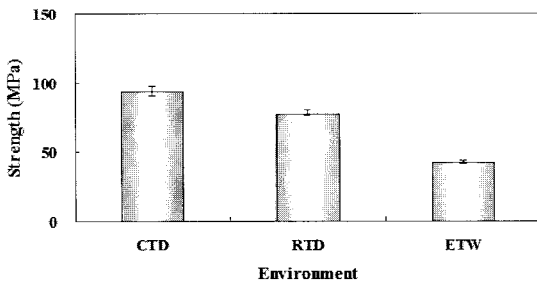


Fig. 11 Shear strengths of [±45]_{ss} specimens for each condition.

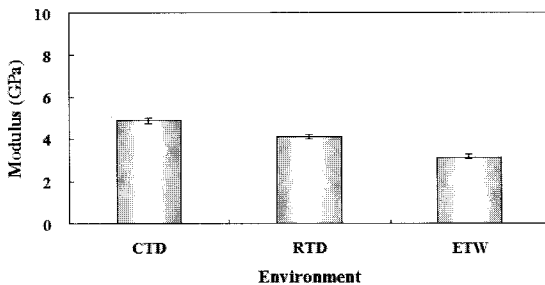


Fig. 12 Shear modulus of [±45]_{ss} specimens for each condition.

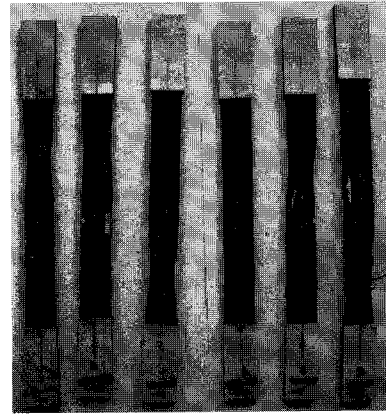


Fig. 13 Photos of shear failure of [±45]_{ss} specimens for ETW.

Fig. 11와 12는 환경 조건에 따른 전단강도와 전단 탄성계수를 측정된 결과이다. 과도하중에 대한 전단변형률이 크게 나타나 5% 전단변형률에 대한 전단강도 값을 전단강도로 취하였다. 전반적인 시험결과를 살펴보면 RTD와 ETW의 경우 분산계수 5% 미만으로 양호하였으나 CTD의 경우 전단강도에 대한 분산계수가 7% 정도로 시편에 따라 전단강도의 변화가 좀 더 크게 나타남을 알 수 있다. 상온에 비해 CTD의 전단강도는 21% 증가하였고, 전단 탄성계수는 19% 증가하였다. 이는 저온에서 섬유와 모재의 취성 증가에 기인된다고 분석된다. ETW의 전단강도는 상온에 비해 45% 감소하였고, 전단탄성계수는 24% 감소하였다. ETW 시편은 침투한 수분에 의해 섬유와 모재의 결합부 물성이 저하한 것으로 판단된다. Fig. 13 시편의 파손된 양상을 보여주고 있다. 적층면 사이의 층간 전단강도를 측정하기 위한, 3점굽힘시험은 [0/45/-45/45/-45/0]_{ss} 적층의 RTD 6개 시편에 대한 시험을 수행하였다. 층간 전단 강도는 85.4 MPa를 얻었으며, 층간 전단강도에 대한 분산계수는 3.6%로 양호한 결과를 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 탄소섬유강화 복합재 구조물의 실제 사용조건인 환경에 따른 기계적 특성 연구를 수행하기 위하여, [0]_{6T}, [90]_{12T}, [0]_{16T}, [90]_{16T}, [±45]_{ss}, [0/45/-45/45/-45/0]_{ss} 등의 실험을 통해 설계관련 데이터베이스를 확보하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [0]_{6T} 적층판의 인장시험 결과, 상온에 비해 CTD의 인장강도 증가는 섬유와 모재의 열팽창계수 거동의 특성에 따른 취성 증가의 요인으로 분석된다. 탄성계수는 환경에 의존하지 않고 RTD, CTD, ETW 거의 같은 값을 얻었으며, 이는 탄성계수의 응력-변형률 관계에서 일방향 섬유의 지배적인 특성에 기인한다.

- 2) 환경에 의한 모재의 지배적인 물성 변화를 알아보기 위해, [90]₁₂ 시편을 이용하여 인장시험 결과, CTD의 인장강도 증가는 모재의 취성 증가의 요인으로 분석된다. ETW의 탄성계수 감소는 모재에 침투한 수분이 물성을 저하시킨 것으로 분석된다.
- 3) 상온에 비해 CTD의 전단강도와 전단 탄성계수 증가는 저온에서 섬유와 모재의 취성 증가에 기인한다. ETW의 전단강도와 전단탄성계수 감소는 침투한 수분에 의해 섬유와 모재의 층간 결합부의 물성이 저하한 것으로 분석된다.

후 기

본 연구는 한국항공우주산업(주) 지원으로 수행된 것입니다.

참고문헌

- 1) Reinhart J.J. and et al., *Composites*, ASM International, Vol. 1, 1987, pp. 479-495.
- 2) Shen, C.H. and Springer, G.S., "Effect for Moisture and Temperature on the Tensile Strength of Composite Materials," *Journal of Composite materials*, Vol. 11, 1997, pp. 2-6.
- 3) Whitley S.K., and Gates T.S., "Thermal/Mechanical Response and Damage Growth in Polymeric Composites at Cryogenic Temperatures," *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 10, 2004, pp. 1991-2001.
- 4) 김명곤, 강상국, 김친곤, 공철원, "극저온 환경에서 탄소섬유 강화 복합재의 인장 물성에 관한 연구," 한국복합재료학회지, 제17권, 제6호, 2004, pp. 52-57.
- 5) 강상국, 김명곤, 김친곤, 공철원, "복합재-알루미늄 양면접치기 조인트를 이용한 접착제의 극저온 물성 평가," 한국복합재료학회지, 제19권, 제4호, 2006, pp.23-30.
- 6) 김윤해, 김국진, 조영대, 배성열, 문경만, 한중원, 김동훈, "섬유강화 복합재료의 전단강도에 미치는 흡습의 영향," 한국복합재료학회지, 제21권, 제2호, 2008, pp. 1-7.
- 7) 김윤해, 김국진, 한중원, 조영대, 배성열, 문경만, "복합재료의 수분에 의한 열화 및 회복 메커니즘에 관한 연구," 한국복합재료학회지, 제21권, 제2호, 2008, pp. 8-14.
- 8) ASTM D 3039, Standard Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- 9) ASTM D 3410, Standard Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading.
- 10) ASTM D 3518, Standard Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate.
- 11) M. S. Madhukar, and L. T. Drzal, "Fiber-matrix Adhesion and its Effects on Composite Mechanical Properties: II. Longitudinal(0) and Transverse(90) Tensile and Flexural Behavior of Graphite/epoxy Composites," *Journal of Composite material*, Vol. 25, 1991, pp. 958-991.
- 12) ASTM D 2344, Standard Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates.