

論文

저온건조(-55℃) 및 고온다습 조건(108.3℃)의 기계적 체결 홀이 탄소섬유강화 복합재의 강도 특성에 미치는 영향 연구

김효진*

Effect of Filled Hole on Strength Behavior of CFRP Composites at Cold Temperature Dry and Elevated Temperature Wet

Hyojin Kim*

ABSTRACT

The effect of open and filled holes on the strength behavior of carbon fiber reinforced polymeric (CFRP) composites was investigated. The strength was measured at room temperature dry, cold temperature dry, -55℃, and elevated temperature wet, 108.3℃ on several different laminate configurations. Based on the experimental data presented, it is shown that the filled hole tensile strength is larger than that of open hole by reducing damage around the hole due to the constraint imposed by the fastener. The tensile strength at cold temperature dry, -55℃ is increased with the brittleness by the thermal expansion coefficient of fiber and matrix. The compressive strength at elevated temperature wet, 108.3℃ is decreased by the cause of interfacial deterioration between fiber and matrix with moisture absorption.

초 록

본 연구에서는 노치 홀과 기계적 체결 홀이 탄소섬유강화 복합재의 강도특성에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다. 강도는 상온건조, 저온건조(-55℃)와 고온다습 조건(108.3℃)에서 측정하였으며, 실험결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다. 기계적 체결 홀에서 인장강도의 증가는 볼트에 의해서 가해진 구속으로 홀 주위의 손상을 억제함으로써, 강도를 증가시킨 것으로 분석된다. 저온(-55℃)에서 인장강도의 증가는 섬유와 모재의 열팽창계수 거동의 특성에 따른 취성 증가의 요인이며, 고온다습 조건(108.3℃)에서 압축강도 감소는 침투한 수분에 의해 섬유와 모재의 층간 결합부의 물성이 저하한 것으로 사료된다.

Key Words : 탄소섬유강화 복합재료(carbon fiber reinforced composite), 노치 홀(open hole), 기계적 체결 홀(filled hole), 저온건조(cold temperature dry), 고온다습(elevated temperature wet), 강도(strength)

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]. 복합

재료는 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]. 또한, 복합재 구조물의 설계에서 가장 중요한 부분 중 하나가

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

부품과 부품의 체결 혹은 조립이다. 일반적으로 복합재료 적층 구조물의 체결방법은 크게 기계적 체결방법과 접착에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 기계적 체결 방법은 모재에 원공을 가공한 후 볼트나, 리벳 혹은 핀 등을 이용하여 결합하는 방식으로, 분해결합이 쉽고 파손점검 및 수리가 용이하며 표면 처리가 필요 없는 장점을 가지고 있다. 따라서 탄소섬유강화 복합재료를 실제 구조물에 사용하기 위해서는 실제 사용 조건에서의 복합재료 체결에 대한 충분한 이해와 설계관련 데이터베이스의 확보가 선행되어야 한다.

저온에서 고온 영역까지 온도가 변함에 따라, 복합재료의 기계적 성질 등의 변화가 일어날 수 있다. 따라서 그동안 환경 조건에 따른 복합재료의 기계적 물성에 대한 연구가 수행되어 왔다[3-7]. 김명곤 등[4]은 저온 환경의 열-하중 사이클 인장 실험을 통하여, 섬유 방향의 열팽창계수는 온도가 감소함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이고, 상온으로부터 -50℃ 부근까지 시편은 음의 열팽창계수를 값을 갖는 반면에, -100℃와 -150℃ 부근에서는 양의 열팽창계수 값을 가짐을 확인하였다. 섬유 수직방향의 열팽창계수는 상온에서 -50℃ 부근까지는 약간 증가하다가 다시 저온으로 갈수록 감소하는 경향을 보임을 확인하였다. 김윤혜 등[6]은 80℃ 수 환경(담수/해수)에서 100~200일 동안 침지 후에 건조한 시편으로 전단강도 실험을 통하여, 125℃ 경화용 시편이 177℃ 경화용 시편과 비교하여 침지 주기별 전단강도 하락이 월등히 커지는 현상을 보였으며, 이는 층간 전단강도 시험에서 125℃ 경화용 시편은 침투한 수분에 의하여 섬유와 모재의 층간 결합부에 영향을 받아 물성이 저하한 것으로 보고하였다. 또한, 복합재료 체결에 대한 설계관련 데이터베이스를 확보하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다[8-11]. Shimokawa 등[8]은 노치 홀이 존재하는 준등성 적층판의 강도실험을 수행하여, 상온에 비하여 150℃에서 인장강도의 5% 감소와 압축강도의 16% 감소를 확인하였으며, 인장강도의 섬유 지배적인 특성과 압축강도의 모재 지배적인 특성을 보고하였다. 최재민 등[11]은 복합재료 적층판 원공 주위의 응력해석을 통하여, 와서의 조임력은 볼트에 가해진 토크가 복합재료 적층판에 가하는 압력으로 산정하여, 와서의 적당한 조임력의 선정은 인장에 의한 파손을 방지할 수 있는 요소임을 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 사용조건인 상온건조, 저온건조, 고온다습 환경에 따른 기계적 체결 홀이 탄소섬유강화 복합재료의 강도 특성에 미치는 영향을 연구함으로써, 복합재료의 설계관련 데이터베이스를 확보하고자 한다.

2. 환경조건에서 기계적 특성 실험

2.1 재료 및 시편

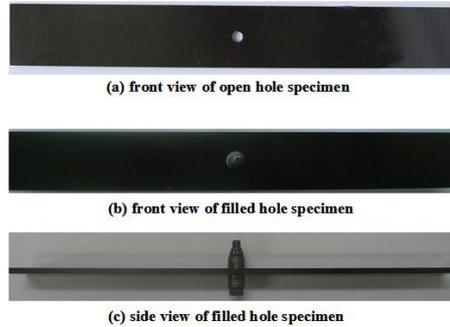


Fig. 1 Photos of two type specimens.

복합재 시편에 사용한 재료는 Cycom 5276-1 G40-800 24k 프리프레그 테이프이며, 시편은 3가지 형태의 적층, 패턴_1 : [45/-45/90/45/-45/45/-45/0/45/-45]s, 패턴_2 : [45/0/-45/90]3s, 패턴_3 : [45/0/-45/90/0/0/45/0/-45/0]s로 적층하여 제작하였다. 패턴_1과 패턴_3은 적층이 20층(3.81mm)이고, 패턴_2는 24층(4.57mm)이다. 각 적층순서에 따른 적층각도별 비율을 보면 패턴_1의 경우 적층각도 0°, 45°, 90°의 비율이 10%, 80%, 10%이고, 패턴_2는 25%, 50%, 25%, 패턴_3는 50%, 40%, 10%이다. 적층수가 다르지만 적층각의 구성비에 따라 강도의 변화를 보기 위함이다. 적층 구성비에 대한 결과를 비교하기 위해서 유효강성(effective modulus)을 구하였다. 패턴_1의 유효강성은 $E_1=38.6$ GPa, $E_2=38.6$ GPa, $G_{12}=34.1$ GPa, 패턴_2는 $E_1=60.9$ GPa, $E_2=60.9$ GPa, $G_{12}=23.2$ GPa, 패턴_3는 $E_1=94.2$ GPa, $E_2=37.6$ GPa, $G_{12}=19.6$ GPa 이다.

시편의 폭은 W/D 영향을 살펴보기 위하여 W=25.4mm, 38.1mm, 50.8mm, 57.15mm, 63.5mm로 제작하였으며, 홀은 시편 중앙에 직경(D)=3.175mm, 6.35mm, 9.525mm, 12.7mm로 가공하였다. 기계적 체결 홀 인장시험에서 볼트의 체결 토크는 9.05-10.74 N·m(80-95 lb·in), 압축시험에서 2.26-3.39 N·m(20-30 lb·in)의 토크를 가하였다. 시편의 형상은 Fig. 1에 보인 바와 같다.

2.2 환경 노출 실험 조건

시험 환경은 온도와 수분 함유의 4가지 경우이며, 조건은 다음과 같다.

- 1) 저온건조(CTD, cold temperature dry) : -55℃±2.8℃(-67°F±5°F), 시험시 안정화 시간으로 정해진 온도에 도달 후 5~6분 안정화 시간을 갖는다.
- 2) 상온건조(RTD, room temperature dry) : 18.3℃(65°F)~23.9℃(75°F), 45~55% RH(relative humidity)
- 3) 고온다습 A(ETW, elevated temperature wet) : 82.2℃±2.8℃(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.

- 4) 고온다습 B(ETW+T, elevated temperature wet) : 108.3°C±2.8°C(227°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[12]. 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. 2와 3에 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.

2.4 강도 측정 방법

본 실험에 사용한 시험기는 Instron 8801이며, 변위속도는 1.27 mm/min로 제어하였다. 환경 챔버(environmental chamber)로 저온

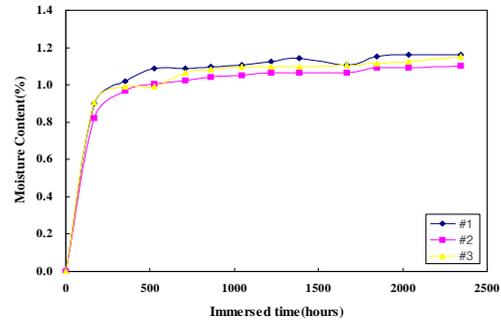


Fig. 2 Water absorption behavior of the specimens with 1.143 mm thickness.

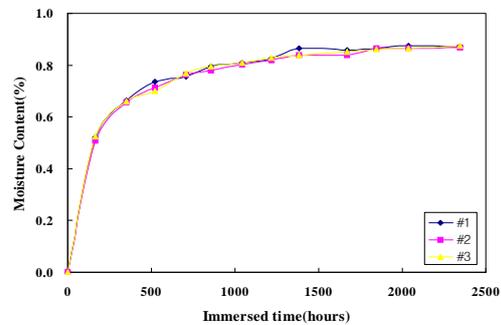


Fig. 3 Water absorption behavior of the specimens with 2.286 mm thickness.

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 ±2°C의 온도 오차 범위를 갖는다.

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[13]. 본 시험 기간 중에는 총 3회에 걸쳐 수행되었는데 처음에 1회, 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, ETW+T 환경 하에서 각 6개씩 수행하였다. 노치 홀 시험(open hole tensile test)은 복합재 중심부에

패스너(fastener)를 장착할 홀이 있는 시편의 인장하중에 대한 제반 물성 데이터를 획득하기 위한 시험으로 ASTM D 5766 방법과 절차로 수행하였다[14]. 노치 홀 압축시험은 ASTM D 6484 방법으로, 중심부에 패스너를 장착할 홀이 있는 시편의 압축거동을 살펴보기 위한 시험으로 좌굴을 방지하기 위한 치구를 시편의 양면에 장착하고 플랫단 하중(flat end loading) 방식으로 압축하중을 가한다[15]. 기계적 체결홀 인장시험(filled hole tensile test)은 중심부에 패스너를 장착한 시편의 인장거동의 특성을 파악하기 위한 시험으로 ASTM D 6742에 따라 하중을 부가하며, 패스너의 베어링 하중은 없고 바이패스(bypass) 하중만 100% 작용하는 상태이다[16]. 기계적 체결홀 압축시험(filled hole compressive test)은 중심부에 패스너를 장착한 시편의 압축거동의 특성을 파악하기 위한 시험으로 ASTM D 6742에 따라 하중을 부가한다. 시험결과에 대한 통계치는 평균값과 표본에 대한 표준편차, 분산계수(coefficient of variation)를 구하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 노치 홀(open hole) 강도 특성

Fig. 4와 5는 냉각조건(-55℃)에 따른 인장강도를 측정한 결과이다. 모든 시험 결과가 분산계수 5% 미만으로 양호한 강도를 얻을 수 있었다. 패턴_1의 시편이 상온에 비해 CTD의 인장강도는 9.2% 증가하고, 패턴_2의 시편은 2.8% 증가하였다.

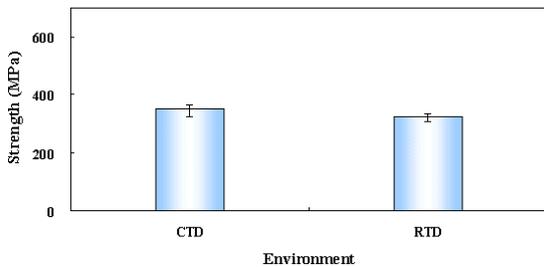


Fig. 4 Open hole tensile strengths of pattern_1 specimens for W/D=6.

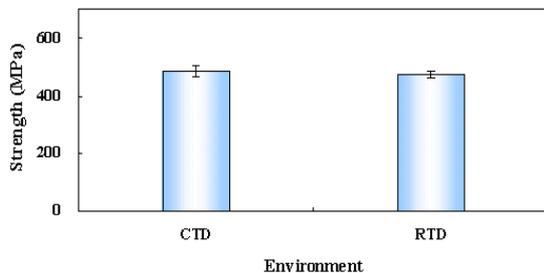


Fig. 5 Open hole tensile strengths of pattern_2 specimens for W/D=6.



(a) pattern_1 specimens



(b) pattern_2 specimens

Fig. 6 Photos of tensile failure of open hole specimens for CTD and W/D=6.

인장강도의 증가는 김명곤 등[4]이 확인한 섬유와 모재의 열팽창계수 거동의 특성에 따른 취성 증가의 요인으로 분석된다. 45° 층이 많은 즉, 유효강성 G_{12} 가 큰 패턴_1이 패턴_2에 비하여 저온에서 인장강도 증가가 큰 이유는 45° 층이 모재에 의하여 내부 축하중을 분담하는데, 모재의 취성 증가에 의하여 모재의 섬유 접합강도의 증가에 기인한다고 분석된다. Fig. 6은 CTD 인장시험에서 파손된 양상을 보여주고 있다.

홀에서 인장파손이 일어났으며, 홀 주위 스프리트(split)와 층간분리(delamination)의 손상을 보인다. 45° 층이 많은 패턴_1이 스프리트와 층간분리 현상이 더 많음을 알 수 있다. Fig. 7은 적층에 따른 인장강도를 측정한 결과이다. 유효강성 E_1 이 클수록 인장강도가 증가함을 알 수 있다. Fig. 8은 패턴_2 적층의 W/D에 따른 인장강도의 변화를 보여주고 있다. W/D에 따른 인장강도의 변화를 확인할 수 있다.

Fig. 9는 적층에 따른 압축강도를 보여주고 있다. 0° 층이 많을수록 즉, 유효강성 E_1 이 클수록 압축강도가 증가함을 알 수 있다. 압축강도는 Fig. 6의 인장강도의 60-80%를 보이고 있다.

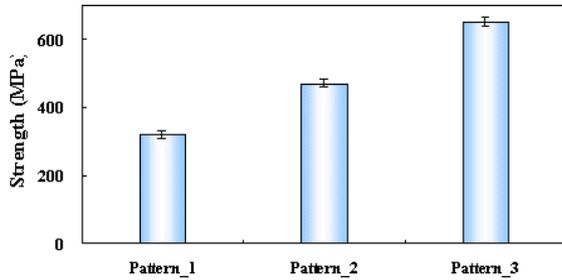


Fig. 7 Open hole tensile strengths for RTD and W/D=6 as a function of pattern.

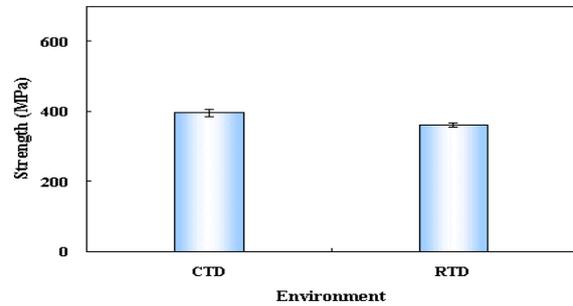


Fig. 10 Filled hole tensile strengths of pattern_1 specimens for W/D=6.

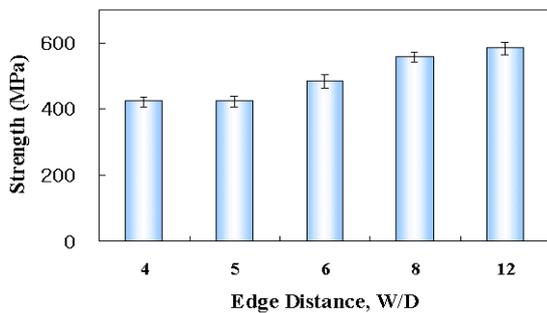


Fig. 8 Open hole tensile strengths of pattern_2 specimens for RTD as a function of edge distance.

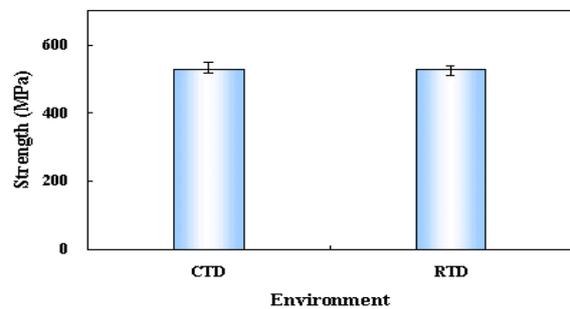


Fig. 11 Filled hole tensile strengths of pattern_2 specimens for W/D=6.

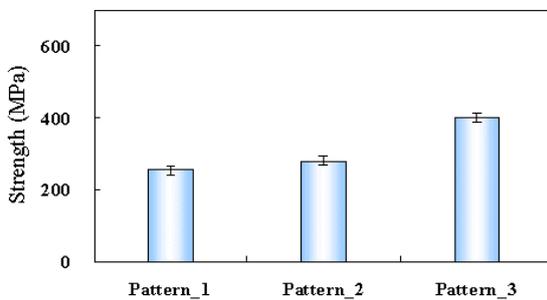


Fig. 9 Open hole compressive strengths for RTD and W/D=6 as a function of pattern.

3.2 기계적 체결 홀(filled hole) 강도 특성

시편 중앙 홀에 볼트가 체결된 상태에서 인장강도를 알아보기 위한 시험이다. 기계적 체결 홀의 강도 특성은 지금까지의 경험으로 살펴보면, 저온환경에서는 인장강도가 문제되고 고온다습 환경에서는 압축강도가 중요하다[16]. 따라서 본 연구에서는 인장시험은 저온환경, 압축시험은 고온다습 환경에서 수행하였다. Fig. 10과 11은 냉각조건(-55℃)에 따른 인장강도를 측정된 결과이다. 모든 시험 결과가 분산계수 5% 미만으로 양호한 강도를 얻을 수 있었다.

패턴_1의 시편은 상온에 비해 CTD의 인장강도는 9.6% 증가하였다. 인장강도의 증가는 섬유와 모재의 열팽창계수 거동의

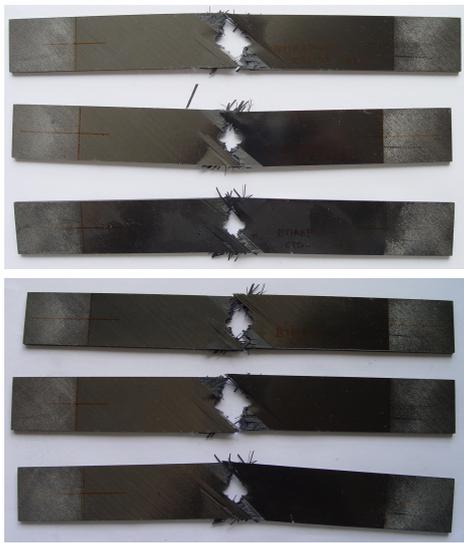
특성에 따른 취성 증가의 요인으로 분석된다. 45°층이 많은 즉, 유효강성 G_{12} 가 큰 패턴_1이 패턴_2에 비하여 저온에서 인장강도 증가가 큰 이유는 45°층이 모재에 의하여 축하중을 분담하는데, 모재의 취성 증가에 의하여 모재의 섬유 접합강도의 증가에 기인한다고 분석된다. Fig. 12는 CTD 인장시험에서 파손된 양상을 보여주고 있다.

홀에서 인장파손이 일어났으며, 홀 주위 스플리트(split)와 층간분리(delamination)의 손상을 보인다. 노치 홀에 비해서 스플리트와 층간분리의 손상이 다소 작은 이유는 홀 주위에 볼트에 의해서 가해진 구속 때문에 홀 주위 손상이 억제되었다고 사료된다. Fig. 4와 10에 보인 바와 같이 패턴_1의 볼트가 체결된 상태에서 인장강도는 노치 홀 인장강도에 비해서 12% 정도 증가함을 알 수 있다. 이는 볼트에 의해서 가해진 구속 때문에 홀 주위의 손상을 억제함으로써, 인장강도를 증가시킨 것으로 분석된다.

Fig. 13과 14는 고온다습 조건(108.3℃)에 따른 압축강도를 측정된 결과이다. 전반적으로 분산계수가 5% 미만으로 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 패턴_2의 시편이 ETW에 비해 ETW+T의 압축강도는 16.2% 감소하고, 패턴_3의 시편은 9% 감소하였다. 침투한 수분에 의해 섬유와 모재의 층간 결합부의 물성이 저하한 것으로 판단된다. 45°층이 많은 즉, 유효강성 G_{12} 가 큰 패턴_2가 패턴_3에 비하여 고온다습 조건에서 압축강도 저하가 큰 이유는 45°층이 모재에 의하여 축하중을 분담하는데, 섬유와 모재의 층간 결합부의 물성이 저하에 의하여 모재의 섬유 접합강도의 저하에 기인한다고 분석된다. Fig. 15는 ETW+T 압축시험에서 파손된 양상을 보여주고 있다.



(a) pattern_1 specimens



(b) pattern_2 specimens

Fig. 12 Photos of tensile failure of filled hole specimens for CTD and W/D=6.

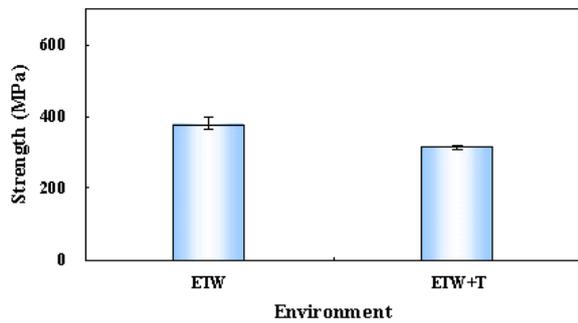


Fig. 13 Filled hole compressive strengths of pattern_2 specimens for W/D=6.

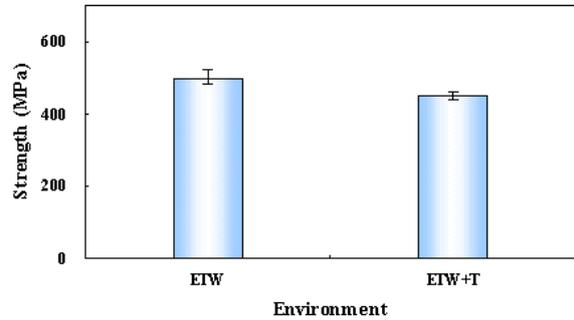


Fig. 14 Filled hole compressive strengths of pattern_3 specimens for W/D=6.



(a) specimens for ETW



(b) specimen for ETW+T

Fig. 15 Photos of compressive failure of filled hole specimens for pattern_2 and W/D=6.

주로 홀에서 파단이 일어났으며, 일부는 홀에서 벗어난 위치에서 파단되었다. 홀 주위에서 일부 스프리트와 층간분리가 관찰된다. 파손 메카니즘은 마이크로 버클링(micro-buckling)에 의한 층간분리에 의해서 압축 버클링 파손으로 사료된다. Fig. 16은 적층에 따른 압축강도(W/D=6, ETW)를 측정된 결과이다. 유효강성 E_1 이 클수록 압축강도가 증가함을 알 수 있다.

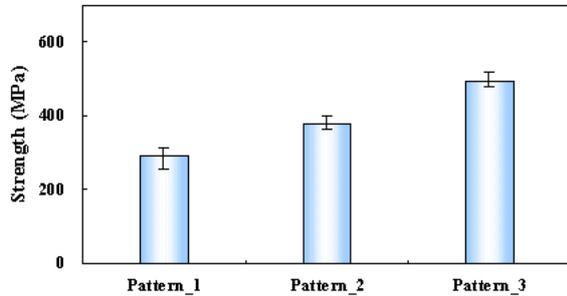


Fig. 16 Filled hole compressive strengths of specimens for ETW and W/D=6 as a function of pattern.

4. 결론

본 연구에서는 실제 사용조건인 상온건조, 저온건조, 고온다습 환경에 따른 기계적 체결 홀이 탄소섬유강화 복합재의 강도 특성에 미치는 영향을 연구함으로써, 복합재의 설계관련 데이터베이스를 확보하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상온과 저온(-55°C) 환경에서 기계적 체결 홀 인장강도의 12% 정도의 증가는 볼트에 의해서 가해진 구속으로 홀 주위의 스프리트와 충전분리 등의 손상을 억제함으로써, 인장강도를 증가시킨 것으로 분석된다.
- 2) 저온(-55°C)에서 인장강도의 증가는 섬유와 모재의 열팽창계수 거동의 특성에 따른 취성 증가의 요인으로 분석되며, 45°층이 많은 즉, 유효강성 G_{12} 가 큰 적층에서 인장강도 증가가 큰 이유는 45°층이 모재에 의하여 축하중을 분담하는데, 모재의 취성 증가에 의하여 모재의 섬유 접합강도의 증가에 기인한다.
- 3) 고온다습 조건(108.3°C)에서 압축강도 감소는 침투한 수분에 의해 섬유와 모재의 충전 결합부의 물성이 저하한 것으로 판단되며, 45°층이 많은 적층에서 압축강도 저하가 큰 이유는 45°층이 모재에 의하여 축하중을 분담하는데, 섬유와 모재의 충전 결합부의 물성이 저하에 의하여 모재의 섬유 접합강도의 저하에 기인한다고 분석된다.
- 4) 인장강도와 압축강도는 유효강성 E_1 에 지배적이고, 환경에 따른 강도의 변화는 유효강성 G_{12} 에 좌우됨을 확인하였다.

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) 김명근, 강상국, 김천근, 공철원, "극저온 환경에서 탄소 섬유강화 복합재의 인장 물성에 관한 연구," *한국복합재료학회지*, 제17권, 제6호, 2004, pp. 52-57.
- 5) 김명근, 강상국, 김천근, 공철원, "극저온 환경에서 탄소 섬유강화 복합재료의 수지조성변화에 따른 인장 물성 측정," *한국복합재료학회지*, 제20권, 제4호, 2004, pp. 1-8.
- 6) 김윤해, 김국진, 조영대, 배성열, 문경만, 한중원, 김동훈, "섬유강화 복합재료의 전단강도에 미치는 흡습의 영향," *한국복합재료학회지*, 제21권, 제2호, 2008, pp. 1-7.
- 7) Bullions T.A., Loos A.C., and Mcgrath, J.E., "Moisture Sorption Effects on and Properties of a Carbon Fiber-reinforced Phenylethynyl-terminated Poly(etherimide)," *Journal of Composite materials*, Vol. 37, No. 9, 2003, pp. 791-809.
- 8) Shimokawa T., Kakuta Y., Hamaguchi Y., and Aiyama T. "Static and Fatigue Strengths of a G40-800/5260 Carbon Fiber/Bismaleimide Composite Material at Room Temperature and 150," *Journal of Composite materials*, Vol. 42, No. 7, 2008, pp. 655-679.
- 9) Johnson W.S., and Treasurer P., "Radiographic Investigation of the Effects of Ply Modification on Damage Development in Laminates Containing Circular Holes," *Journal of Composite materials*, Vol. 42, No. 20, 2008, pp. 2143-2161.
- 10) Mcgregor C., Zobeiry N., Vaziri R., Poursartip A., "A Constitutive Model for Progressive Compressive Failure of Composites," *Journal of Composite materials*, Vol. 42, No. 25, 2008, pp. 2687-2716.
- 11) 최재민, 전홍재, 변준형, "기계적으로 체결된 복합재료 평판에서 다양한 인자의 영향에 따른 원공 주위의 응력분포," *한국복합재료학회지*, 제18권, 제6호, 2005, pp. 9-18.
- 12) ASTM D 5229, Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials.
- 13) ASTM D 3039, Standard Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- 14) ASTM D 5766, Standard Test Method for Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates.
- 15) ASTM D 6484, Standard Test Method for Open Hole Compressive Strength of Polymer Matrix Composite Laminates.
- 16) ASTM D 6742, Standard Practice for Filled Hole Tension and Compression Testing of Polymer Matrix Composite Laminates.