

## 論文

## 고온다습 조건(82.2℃)에서 2열 볼트 체결 복합재 조인트의 강도에 관한 실험적 연구

김효진<sup>\*+</sup>

### An Experimental Study on the Strength of Two Serial Bolt-Fastened Composite Joints under Elevated Temperature and Humid Condition

Hyojin Kim<sup>\*+</sup>

#### ABSTRACT

The failure strengths and modes in carbon fiber reinforced polymeric composites, with two serial bolt-fastened composite joints, were investigated to evaluate the typical joint configurations of composite components. The parametric studies were performed experimentally at room temperature dry and elevated temperature wet, 82.2℃ on several different laminate configurations. Based on the experimental data presented, two basic load-displacements curves are observed. Each failure mode has the characteristic curve. It is showed that the bearing failure mode occurs in elevated temperature wet condition. It is analysed that the strength of bearing failure mode is not highly depending on the effective modulus of specimen. The failure strength at elevated temperature wet is decreased by the cause of interfacial deterioration between fiber and matrix with moisture absorption.

#### 초 록

복합재 부품의 전형적인 조인트 형태를 평가하기 위해서, 2열 볼트 체결 탄소섬유강화 복합재의 파손강도와 파손 모드에 대하여 연구를 수행하였다. 연구는 상온과 고온다습 조건에서 적층과 형상을 변수로 실험적으로 수행되었다. 실험결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다. 하중-변위 선도는 두 가지 형태로 관찰되었으며, 각 파손 모드는 하중-변위 선도로 특징지어진다. 고온다습 조건의 파손형태는 베어링 파손 모드이며, 베어링 파손 모드에서 파손 강도는 유효강성의 영향이 크지 않고 분석된다. 고온다습 조건의 파손강도 감소는 침투한 수분에 의해 섬유와 모재의 층간 결합부의 물성 저하에 기인한다.

**Key Words** : 탄소섬유강화 복합재료(carbon fiber reinforced polymeric composites), 2열 볼트 체결 복합재 조인트(two serial bolt-fastened composite joints), 고온다습(elevated temperature wet), 파손강도(failure strength)

#### 1. 서 론

복합재료는 기존의 등방성 재료에 비해 비강성 및 비강도가 높고 우수한 감쇠특성과 충격 특성으로 인해, 항공기, 우주선, 로봇 팔, 공작 기계 등 다양한 분야에 활용되고 있다[1]. 이와 같이 복합재료를 기계요소 혹은 구조물의 부재로 적용하고자 할 경우 다른 구조부품과 접합이 필요하게 된다. 구조물의 무

게 증가와 강도 저하의 원인이 되는 조인트 부분이 없도록 설계하고 제작하는 것이 이상적이지만, 현실적으로 큰 구조물에 있어서는 가공 공정에 의해 결정되는 가공품의 크기, 상태에 대한 검사, 수리, 운반 또는 조립 등에 따른 제한 요건들에 의해 일부에 하중의 전달을 위한 조인트의 구성은 필수적이다. 따라서 여러 개의 부품으로 이루어진 구조물에서 조인트의 설계는 중요한 연구 분야가 되어 왔다. 이는 거의 예외 없이 구

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

조의 효율이 기본 구조가 아닌 그것이 지니고 있는 조인트에 의해 결정되기 때문이다[2]. 항공기에서 복합재 부품은 기계적인 방법 혹은 접착제에 의한 접합에 의해서 다른 구조 부품과 조립이 된다. 그중에서 두꺼운 복합재 부품을 조립하거나 항공기 운영상의 검사 혹은 수리를 위해서 분해가 필요한 곳에 기계적인 방법인 볼트 체결을 사용하고 있다. 볼트 체결 복합재의 파손 모드는 Fig. 1에 보는 바와 같이 인장 파손(net-section failure), 베어링 파손(bearing failure), 전단 파손(shear-out failure), 볼트 파손(bolt failure)으로 나눌 수 있다. 조인트의 설계 관점에서 보면 베어링 파손이 갑작스러운 파괴가 발생하지 않으므로 다른 파손보다 바람직하다. 또한, 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[3,4]. 따라서 탄소섬유 강화 복합재료를 실제 구조물에 안정적으로 사용하기 위해서는 실제 사용 조건에서의 복합재료 거동에 대한 충분한 이해와 설계관련 데이터베이스 확보가 선행되어야 한다.

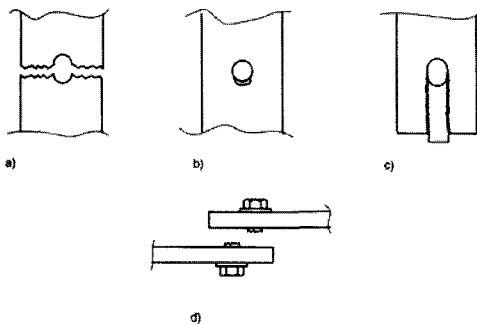


Fig. 1 Failure modes: (a) net-tension failure, (b) bearing failure, (c) shear out failure, (d) fastener failure.

기계적인 체결 조인트에 관하여 이론적인 연구와 실험적인 연구가 수행되고 있다. 이론적인 연구는 이론 해의 한계로 인해 주로 유한요소법을 이용하여 수행하였는데 체결 조인트의 정확한 응력 분포를 얻기 위해서는 볼트와 홀 사이의 마찰, 재료의 비선형성과 3차원적인 효과를 모두 고려하기 때문에 이론적인 연구는 제한적으로 수행하였고 주로 실험적인 연구가 많이 수행되었다[5-10]. Ireman 등[5]은 기계적 체결 홀이 존재하는 준등방성 적층판의 인장실험을 수행하여, 파손 모드인 인장 파손(net-section failure), 베어링 파손(bearing failure), 전단 파손(shear-out failure), 볼트 파손(bolt failure)을 분석하였으며, 홀 주위의 모재 균열, 섬유 파괴, 층간분리, 킨킹(kinking)의 파손 모드를 보고하였다. Karakuzu[6] 등은 유리섬유 강화 복합재 조인트의 2열 핀 하중 홀의 인장실험을 통하여, 홀 직경과 끝단 거리의 비(E/D), 홀 직경과 시편 폭의 비(W/D), 홀 직경과 두 홀 사이의 거리 비(M/D)와 같은 기하학적 변수의 영향을 분석하였다. Lawlor 등[7]은 3열 볼트 복합

재 조인트에 대한 인장실험을 수행하여, 볼트-홀 간극은 최대 베어링 하중에는 독립적이고 파손 시작 하중에는 영향을 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 실제 사용하고 있는 조인트의 평가를 위해서 2열 볼트 체결에 대한 실험을 수행하여, 82.2℃의 고온다습 조건에서 기계적 체결 홀이 탄소섬유 강화 복합재의 강도 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 환경조건에서 기계적 특성 실험

### 2.1 재료 및 시편

복합재 시편에 사용한 재료는 Cycom 5276-1 G40-800 24k 프리프레그 테이프이며, Table 1에 보인 바와 같이 시편은 3가지 형태의 적층, 패턴\_1 : [45/-45/90/45/-45/45/0/45/-45]s, 패턴\_2 : [45/0/-45/90]2s, 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 E1=38.6 GPa, E2=38.6 GPa, G12=34.1 GPa, 패턴\_2는 E1=60.9 GPa, E2=60.9 GPa, G12=23.2 GPa, 패턴\_3는 E1=94.2 GPa, E2=37.6 GPa, G12=19.6 GPa 이다.

시편의 형태는 Fig. 2에 보는 바와 같다[11]. 시편의 폭과 직경은 Table 2에 보인 바와 같이 바이패스 파손과 베어링 파손 모드를 얻기 위하여 W=31.75 mm, 38.1 mm로 제작하였으며, 홀은 시편 중앙에 직경 D=6.35 mm로 가공하였다. 기계적 체결 홀 인장실험에서 볼트는 9.05-10.74 N·m(80-95 lb·in)의 토크를 가하여 체결하였다.

Table 1 Laminate configurations

Laminate	Stacking sequence	0°/ 45°/ 90°
Pattern_1	[45/-45/90/45/-45/45/0/45/-45]s	10%/80%/10%
Pattern_2	[45/0/-45/90]2s	25%/50%/25%
Pattern_3	[45/0/-45/90/0/0/45/0/-45/0]s	50%/40%/10%

Table 2 Specimen configurations

Specimen No.	Environment	W/D	W	D	t	Laminate
1	RTD	5	31.75	6.35	3.81	Pattern_1
2	RTD	5	31.75	6.35	4.57	Pattern_2
3	RTD	5	31.75	6.35	3.81	Pattern_3
4	RTD	6	38.1	6.35	3.81	Pattern_1
5	ETW	6	38.1	6.35	3.81	Pattern_1
6	RTD	6	38.1	6.35	4.57	Pattern_2
7	ETW	6	38.1	6.35	4.57	Pattern_2
8	RTD	6	38.1	6.35	3.81	Pattern_3
9	ETW	6	38.1	6.35	3.81	Pattern_3

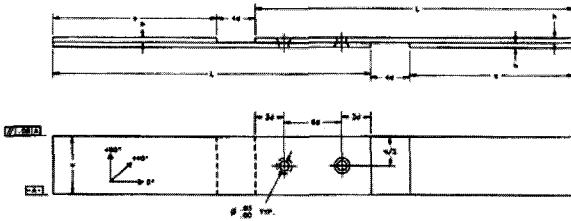


Fig. 2 Geometry of the specimen with two serial bolt-fastened composite joints.

2.2 환경 노출 실험 조건

시험 환경은 온도와 수분 함유의 2가지 경우이며, 조건은 다음과 같다.

- 1) 상온건조(RTD, room temperature dry) : 18.3 °C(65 °F)-23.9 °C(75 °F), 45~55 % RH(relative humidity)
- 2) 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 2 시간 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[12].

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

- $W_i$  : 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 입수되기

까지의 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. 3과 4에 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.

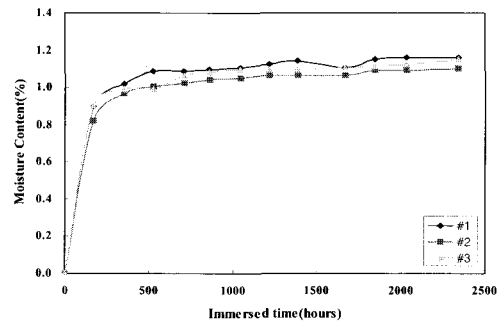


Fig. 3 Water absorption behavior of the specimens with 1.143 mm thickness.

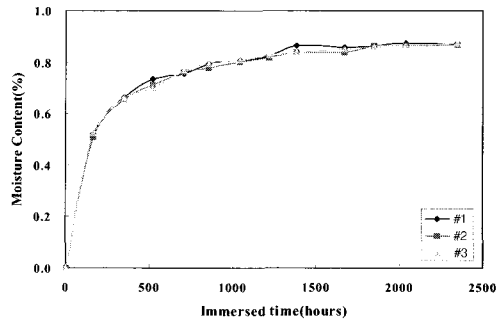


Fig. 4 Water absorption behavior of the specimens with 2.286 mm thickness.

2.4 강도 측정 방법

본 실험에 사용한 시험기는 Instron 8801이며, 변위속도는 1.27 mm/min로 제어하였다. 환경 챔버(environmental chamber)로 고온 실험 장치를 구성하였으며, 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]. 시스템 얼라인먼트 확인 결과 굽힘 성분의 크기가 5 % 미만으로 나타나 시험기 상태는 양호함을 확인하였다. 시험은 RTD, ETW 환경 하에서 각 5개씩 수행하였다. 볼트 체결 특성을 알아보기 위한 시험으로 Fig. 2에 보인 바와 같이 2개의 패스너를 통해 연결되는 단일 전단(single-shear) 형태의 시편에 인장하중을 부가한다[11]. 파손 강도는 다음과 같이 계산한다.

$$\sigma = \frac{P}{\kappa Dh} \quad (2)$$

여기서  $P$ 는 최대하중,  $\kappa$ 는 홀 인자로 단일 패스너인 경우 1.0, 2열 패스너인 경우 2.0를 택하는데, 본 시험에서는 2개의 패스너 결합되므로  $\kappa=2.0$ ,  $D$ 는 홀 지름,  $h$ 는 시편 두께를 의미한다. 시험결과에 대한 통계치는 다음과 같이 평균값과 표본에 대한 표준편차, 분산계수(coefficient of variation, COV)를 구하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

고온다습 조건에서 2열 볼트 체결 시편의 파손거동을 실험적으로 연구하였으며, 실험 결과 파손강도는 Table 3에 보인 바와 같다. 모든 시험 결과가 분산계수 5 %미만으로 나타나, 양호한 시험 결과를 얻었다.

볼트 체결 홀의 파손 모드를 얻기 위하여 W/D=5와 6을 변수로 실험을 수행하였으며, W/D=5인 경우는 다음과 같다. Fig. 5에 보는 바와 같이 하중-변위 선도를 살펴보면, 시편에 가하는 인장하중과 시편 그림 변위 관계를 나타내는 선도는 3개의 기울기가 다른 선형 선도를 나타낸다. 기울기가 작은 두 번째 선도는 홀에서 손상의 시작을 의미한다. 하중은 최대하중까지 선형적으로 증가 후에 급속하게 0까지 감소한다. 이는 시편의 한쪽 홀이 절손 되고, 홀 주위에 층간분리와 스프리트(split)가 관찰되는 인장 파손(net-tension failure)을 의미한다[14]. 패턴\_2의 하중-변위선도는 패턴\_1과 같은 거동을 보이고, 패턴\_3의 하중-변위 선도는 Fig. 6에 보인 바와 같다. 선도는 첫 파손까지 거의 선형적으로 증가하며, 첫 파손 후에 두 번째 기울기는 감소함을 알 수 있다. 하중은 최대하중 후에 점차적으로 감소하며, 변위만 증가한다. 이는 시편의 하중 지지를 의미한다. 이와 같은 거동은 홀 주위만 변형되는 가장 바람직한 베어링 파손 모드이다. Fig. 7에 보는 바와 같이 너무 변형이 큰 상태에서는 볼트의 탈착에 애로가 있고 이미 볼트 홀 주위가 베어링 파손 형태인 것이 명확하여, 시편 파단에 이르기까지 하중을 부가하는 것이 큰 의미가 없어 시험을 중지하였다.

Table 3 Failure strengths of the specimens with two serial bolt-fastened composite joints

Specimen No.	Environment	W/D	Laminate	Strength (MPa)	COV
1	RTD	5	Pattern_1	720.7	1.86
2	RTD	5	Pattern_2	918.4	1.44
3	RTD	5	Pattern_3	953.6	1.92
4	RTD	6	Pattern_1	890.9	2.22
5	ETW	6	Pattern_1	671.1	2.72
6	RTD	6	Pattern_2	940.5	1.03
7	ETW	6	Pattern_2	773.7	1.23
8	RTD	6	Pattern_3	909.5	3.73
9	ETW	6	Pattern_3	727.6	1.29

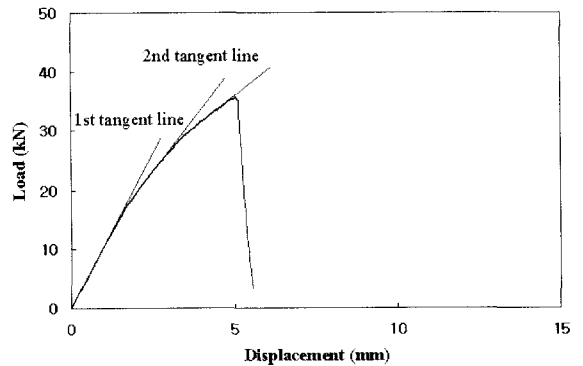


Fig. 5 Load-displacement curve of the specimen for W/D=5, pattern\_1 and RTD.

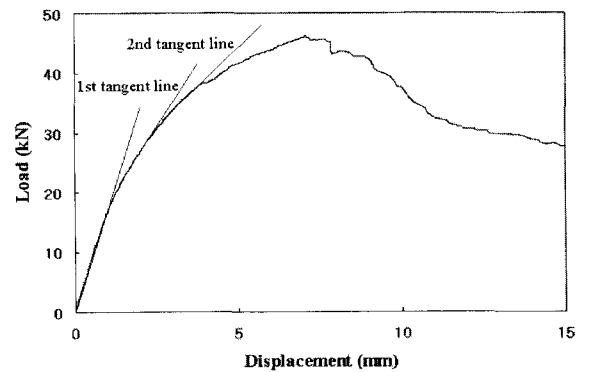


Fig. 6 Load-displacement curve of the specimen for W/D=5, pattern\_3 and RTD.

적층에 따른 W/D=5 시편의 파손강도를 측정된 결과는 Fig. 8에 보인 바와 같다. 패턴\_2와 패턴\_3의 파손 강도는 패턴\_1에 비해서 27%, 32% 증가하였다. 유효강성  $E_1$ 이 클수록 파손 강도는 증가하지만, 패턴\_3의 파손 강도는 크게 증가하지 않음을 알 수 있다. Fig. 9에 보인 바와 같이 파손

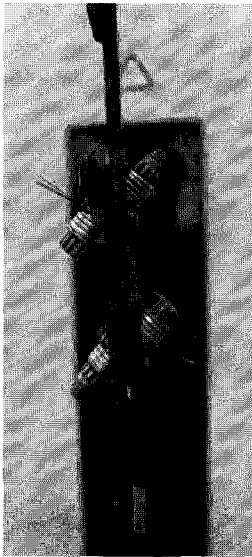


Fig. 7 Deformation of the specimen for W/D=5, pattern\_3 and RTD.

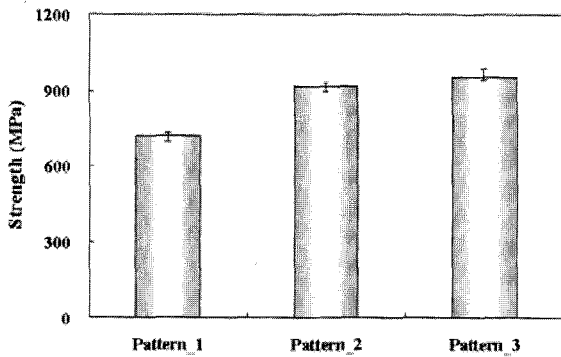
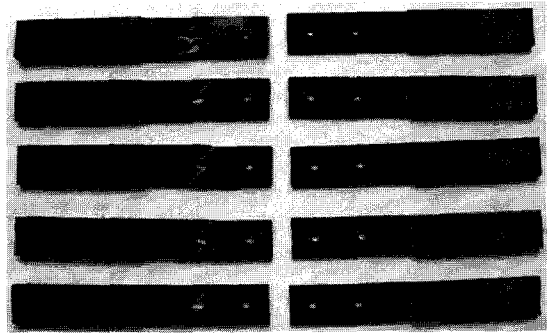


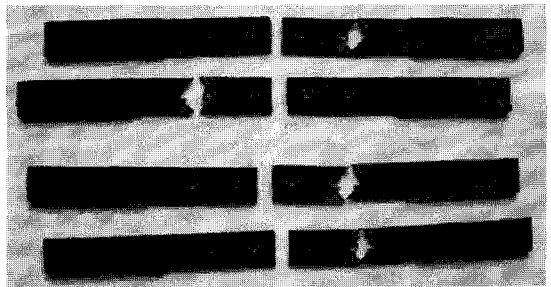
Fig. 8 Failure strengths of the specimens for W/D=5 and RTD as a function of pattern.

모드를 통하여 분석하면, 패턴\_1과 패턴\_2는 인장 파손 모드를 보여주고, 유효강성이 큰 패턴\_3은 베어링 파손 모드를 나타내고 있다. 유효강성이 큰 패턴\_3에서 파손강도가 크게 증가하지 않은 이유라고 사료된다. 따라서 하중-변위 선도는 인장 파손과 베어링 파손의 두 가지 형태가 분류되며, 각 파손 모드는 하중-변위 선도로 특징지어짐을 알 수 있다.

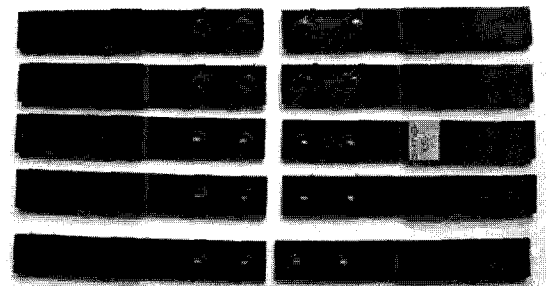
W/D=6 시편의 파손강도를 측정된 결과는 Fig. 10에 보인 바와 같다. 패턴\_2와 패턴\_3의 파손 강도는 패턴\_1에 비해서 5%, 2% 증가하였다. 유효강성 E<sub>i</sub>와 무관하게 파손강도는 별 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 W/D=6과 같이 상대적으로 폭이 큰 시편의 볼트 체결 홀의 파손강도는 유효강성에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 고온다습 환경에서도 유효강성의 영향이 없음을 알 수 있고, 고온다습 환경에서 파손강도는 상온에 비해서 각각 25%, 18%, 20% 감소하였다.



(a) Pattern\_1



(b) Pattern\_2



(c) Pattern\_3

Fig. 9 Photos of failure modes of the specimens for W/D=5 and RTD.

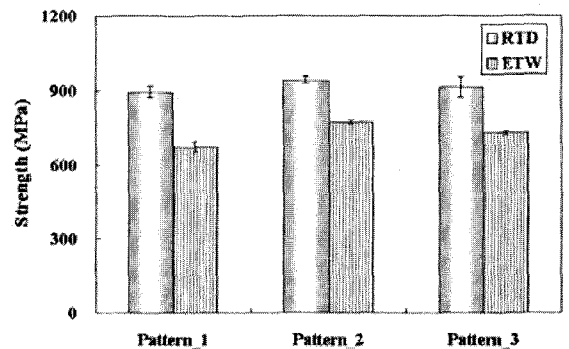
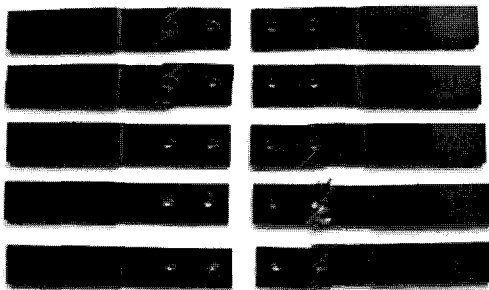
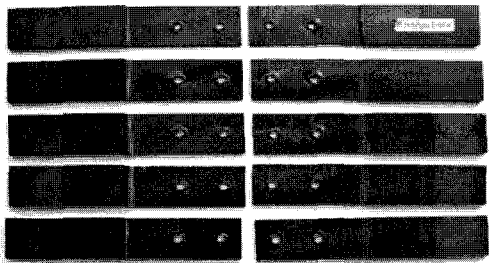


Fig. 10 Failure strengths of the specimens for RTD and ETW (W/D=6).

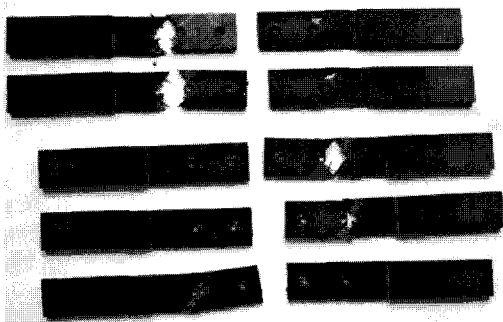


(a) RTD

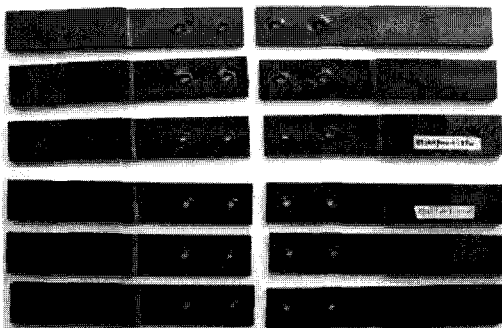


(b) ETW

Fig. 11 Photos of failure modes of the specimens for RTD and ETW of Pattern\_1 (W/D=6).



(a) RTD

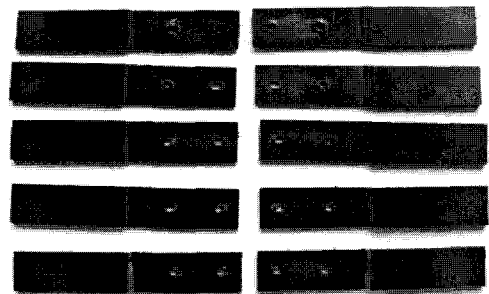


(b) ETW

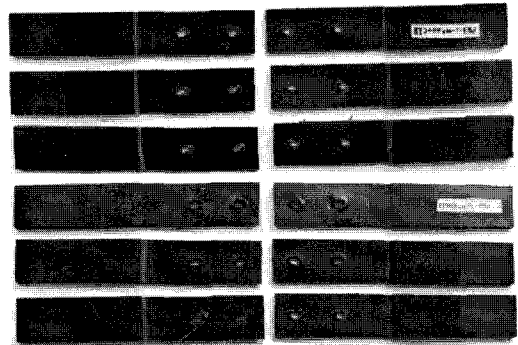
Fig. 12 Photos of failure modes of the specimens for RTD and ETW of Pattern\_2 (W/D=6).

침투한 수분에 의해 섬유와 모재의 층간 결합부의 물성이 저하한 것으로 판단된다. 45°층이 많은 즉, 유효강성  $G_{12}$ 가 큰 패턴\_1이 고온다습 조건에서 파손강도 저하가 큰 이유는 45°층이 모재에 의하여 축 하중을 분담하는데, 섬유와 모재의 층간 결합부의 물성 저하에 의하여 모재의 섬유 접합강도의 감소에 기인한다고 분석된다. 따라서 고온다습 환경에서 파손강도 감소는 침투한 수분에 의해 섬유와 모재의 층간 결합부의 물성 저하에 기인함을 알 수 있다.

Fig. 11~Fig. 13은 시편의 파손 모드를 보여주고 있다. 상온에서는 패턴\_1과 패턴\_2는 인장 파손 모드를 보여주고, 유효강성이 큰 패턴\_3은 베어링 파손 모드를 보여주고 있다. 고온다습 환경에서는 적층에 관계없이 베어링 파손 모드를 보여주고 있다. 볼트 체결 홀의 파손 형태가 베어링 파손 모드인 경우의 파손강도는 유효강성의 영향이 크지 않음을 알 수 있다.



(a) RTD



(b) ETW

Fig. 13 Photos of failure modes of the specimens for RTD and ETW of Pattern\_3 (W/D=6).

#### 4. 결론

본 연구에서는 실제 사용하고 있는 조인트의 평가를 위해서 2열 볼트 체결에 대한 실험을 수행하여, 고온다습 조건에서 기계적 체결 홀이 탄소섬유강화 복합재의 강도 특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 볼트 체결 시편의 하중-변위 선도는 두 가지 형태로 분류되며, 볼트 체결 홀의 인장 파손과 베어링 파손 모드는 하중-변위 선도로 특징지어진다.
- 2) 인장 파손 모드의 시편은 유효강성  $E_1$ 이 클수록 파손 강도는 증가하지만, 베어링 파손 모드의 파손강도는 유효강성의 영향을 크게 받지 않음을 확인하였다.
- 3) 고온다습 조건에서 파손형태는 베어링 파손 모드를 보이고, 파손강도는 유효강성에 크게 영향을 받지 않는다. 파손강도 감소는 침투한 수분에 의해 섬유와 모재의 층간 결합부의 물성이 저하한 것으로 사료된다.
- 4) W/D=6과 같이 상대적으로 폭이 큰 시편의 볼트 체결 홀의 파손강도는 유효강성  $E_1$ 의 영향을 받지 않는다.
- 10) 김효진, “저온건조(-55℃) 및 고온다습 조건(108.3℃)의 기계적 체결 홀이 탄소섬유강화 복합재의 강도 특성에 미치는 영향 연구,” 한국복합재료학회지, 제22권, 제3호, 2009, pp. 82-88.
- 11) ASTM D 5961, Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.
- 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 7248, Standard Test Method for Bearing/Bypass Interaction Response of Polymer Matrix Composite Laminates Using 2-Fastener Specimens.

### 참고문헌

- 1) Reinhart J.J. and et al., *Composites*, ASM International, Vol. 1, 1987, pp. 479-495.
- 2) Vinson J.R., and Sierakowski R.L., *The Behavior of Structure Composite Materials*, Martinus Nijhoff Publishers, 1989, pp. 239-283.
- 3) 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.
- 4) 김운해, 김국진, 한중원, 조영대, 배성열, 문정만, “복합 재료의 수분에 의한 열화 및 회복 메커니즘에 관한 연구,” 한국복합재료학회지, 제21권, 제2호, 2008, pp. 8-14.
- 5) Ireman T., Ranvik T., and Eriksson I., “On Damage Development in Mechanically Fastened Composite Laminates,” *Composite Structures*, Vol. 49, 2000, pp. 151-171.
- 6) Karakuzu R. and et al., “Failure Behavior of Laminated Composite Plates with Two Serial Pin-Loaded Holes,” *Composite Structures*, Vol. 82, 2008, pp. 225-234.
- 7) McCarthy M.A., Lawlor V.P., and Stanley W.F., “An Experimental Study of Bolt-Hole Clearance Effects in Single-lap, Nutibolt Composite Joints,” *Journal of Composite Materials*, Vol 39, No. 9, 2005, pp. 799-825.
- 8) Ahmad H., Johnson W.S., and Counts W.A., “Evaluation of Bolt Bearing Behavior of Highly Loaded Composite Joints at Elevated Temperature,” *Journal of Composite Materials*, Vol 37, No. 6, 2003, pp. 559-571.
- 9) Yan Y., Wen W.D., Chang F.K., and Shyprykevich P., “Experimental Study on Clamping Effects on the Tensile Strength of Composite Plates with a Bolt-filled Hole,” *Composite-Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 30, No. 10, 1999, pp. 1215-1229.