한국염색가공학회지
pISSN 1229-0033, eISSN 2234-036X
연구논문(학술)
https://doi.org/10.5764/TCF.2018.30.4.313

하이브리드 탄소섬유 적층구조에 따른 복합재료의 기계적 특성 연구

Study on the Mechanical Properties of Hybridized Carbon Fiber Composite According to Stacking Structure

*Corresponding author
Seung Goo Lee
(lsgoo@cnu.ac.kr)

구선웅, 오우진, 원종성, 이하람, 윤주영[1], 이승구*
충남대학교 유기소재 · 섬유시스템공학과, [1]우양신소재

Seon Woong Koo, Woo Jin Oh, Jong Sung Won, Ha Ram Lee, Ju Young Youn[1] and Seung Goo Lee*
Department of Advanced Organic Materials and Textile System Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea
[1]Wooyang Advanced Material Co., Daegu, Korea

Received_November 25, 2018
Revised_December 03, 2018
Accepted_December 14, 2018

Abstract As carbon fiber reinforced composites(CFRP) are widely used in aerospace, automobile, marine, and sports goods applications, they have been studied extensively by various researchers. However, CFRP have been pointed out because of machining problems such as delamination and burr phenomenons. Especially, hole machining process, drilling, has non-smooth features on inlet and outlet surfaces of drilled hole. This kind of machining problem can be controlled to some extent by using high modulus pitch-CF, which has considerable effects on fracture behavior of composite compared with only PAN CF composite. Therefore, PAN and pitch hybridized CF composites were prepared having high strength and modulus. The results demonstrate that the hybrid CFRP specimens with pitch CF offer the good potential to enhance modulus as well as strength properties. Dynamic mechanical, flexural, and impact properties were measured and analyzed. Morphological surface of the composites were also observed by IFS-28, canon after hole machining.

Keywords *CFRP, pitch CF, fracture behavior, high modulus, PAN/Pitch CF composites*

Textile Coloration and Finishing
TCF 30-4/2018-12/313-320
©2018 The Korean Society of Dyers and Finishers

1. 서 론

탄소섬유 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Plastics)는 고강도, 고탄성 소재로 스포츠레저, 항공기, 우주왕복선 및 구조재 등 많은 산업 분야에서 핵심재료로서 이용되어 왔다. 하지만 최근 환경 규제 및 연비 규제 강화로 인해 항공기, 철도, 자동차 산업에서도 높은 강도와 우수한 기계적 특성을 갖추면서 경량화를 추구하는 산업적 요구에 발 맞춰 탄소섬유 복합재료의 관심이 커져가고 있고, 앞으로도 계속 응용범위가 증가될 주요 소재이다[1-3].

탄소섬유는 출발물질에 따라 레이온계, Pitch계, PAN계 탄소섬유로 구분되지만 PAN계와 Pitch계 탄소섬유가 주종을 이루고 있다. 복합재료에 응용되고 있는 탄소섬유는 크게 PAN계와 Pitch계 탄소섬유로 나누어 볼 수 있다.

현재 PAN계 탄소섬유는 최소 85% 이상의 아크릴로니트릴(AN) 이외에 메틸메타크릴레이트(MMA), 메틸아크릴레이트(MA), 비닐아세테이트(VA), 염화비닐(VC) 등과 같은 공단량체를 최대 15% 정도 함유하고 있다. PAN계 탄소섬유는 일반적으로 고강도, 고탄성 및 저밀도를 갖는다[4-6]. 또한, Pitch계 탄소섬유는

www.kci.go.kr

Table 1. Specifications of materials used in this study

Materials		Fiber(Toray Co.,)		Resin(TB carbon Co.,)		
		Content [wt. %]	Density [g/cm^3]	Content [wt. %]	Tg [℃]	Resin flow [wt. %]
Prepreg	PAN	60.9	1.84	39.1	121	12 ± 5
	Pitch	56.61	2.12	43.39		

PAN계 탄소섬유와 달리 석유 또는 석탄 Pitch로부터 전구체를 얻어 만들어지는 섬유이다. 등방성과 이방성의 두 가지 Pitch는 각각 저탄성률과 고탄성률의 탄소섬유를 제조하는데 사용되지만, 등방성 Pitch는 제조공정상 안정화 단계에서 장시간을 필요로 하기 때문에 mesophase라고 불리는 이방성 Pitch를 사용한다. 이는 PAN계 탄소섬유보다 높은 탄성률의 특징을 가지고 있으며, 우수한 전기적, 열적 특성을 갖는다[7-9].

탄소섬유 복합재를 이용하여 부품을 만들기 위해서는 여러 공정이 필요하고, 가공 공정에 따라 최종 부품의 품질이 결정된다. 그 중에서도 실제 제품에 적용하기 위해서는 홀(hole) 가공 공정이 필요하다. 그러나 CFRP는 drilling과 route milling과 같은 가공을 한 후에 층간분리현상인 박리(delamination)와 가공 결함의 uncut fiber, resin burning, spalling, exit burrs 등이 발생한다. 열전도계수가 낮은 CFRP는 드릴과 같은 공정으로 인해 발생한 열이 가공결함을 발생시키고, 드릴 가공 공정 중에 누르는 힘에 의해 CFRP가 휨으로서 결함을 더 발생시키게 된다[10-13].

따라서 본 연구에서는 홀 가공시 발생하는 결함을 줄이고자 PAN계 탄소섬유와 Pitch계 탄소섬유를 혼합사용하여 복합재료를 제조하였다. 기존 섬유의 방향과 수지의 종류에 관한 연구와 달리 섬유 혼합의 변화를 주어 이를 결함제어에 응용하기 위한 연구를 진행하였다. 특히, Pitch계 탄소섬유를 혼합 사용함으로서 기존재료보다 강성을 높여 휨에 대한 저항을 높이고 발생할 수 있는 결함을 줄이는데 목적을 두었다. 이를 통해 최종적으로 적층순서에 따른 홀 가공 표면형태를 고찰하였다.

2. 실 험

2.1 실험재료 및 복합재료 성형

본 실험에 사용된 프리프레그의 섬유와 수지의 특성은 Table 1에 정리하였으며, 적층구조에 따른 CFRP의 기계적 특성을 비교하기 위해 PAN계 탄소섬유(46J-12K, Toray Co., Ltd., Japan) 및 에폭시수지(PN.012, TB Carbon Co., Ltd., Korea)로 제조된 프리프레그(FP250NS.A, TB Carbon Co., Ltd., Korea)와 Pitch계 탄소섬유(XN-60, Toray Co., Ltd., Japan) 및 에폭시수지(PN.012, TB Carbon Co., Ltd., Korea)로 제조된 프리프레그(OH125NS.A, TB Carbon Co., Ltd., Korea)를 구매하여 사용하였다. 또한 PAN계 탄소섬유와 Pitch계 탄소섬유의 특성은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Physical properties of as-received PAN- and Pitch- based carbon fibers

Fiber	PAN-based	Pitch-based
	46J-12K	XN-60
Tensile strength(MPa)	4,210	3,430
Tensile modulus(GPa)	436	620
Ultimate elongation(%)	1.0	0.6
Density(g/cm^3)	1.84	2.12
Filament diameter(Micron)	5	10
Yield(g/km)	445	890

www.kci.go.kr

Table 3. Hybrid ratio of PAN- and Pitch- CF reinforced composites in this work

Hybrid ratio	PAN CF	Pitch CF
4/0	4	0
3/1	3	1
2/2	2	2
1/3	1	3
0/4	0	4

프리프레그는 몰드의 크기에 맞게 250mm×250mm으로 제단하였고, PAN 0°와 Pitch 0°의 UD 방향으로 각 조건에 맞게 적층시킨 후 hot-press로 성형하여 복합재료를 제조하였다.

Table 3에 표시한 일방향 적층구조조건에 따라 ASTM 규격에 맞는 두께로 준비했으며, PAN계와 Pitch계 탄소섬유 프리프레그의 적층구조에 따른 변수를 두었다. 이와 같이 적층된 형태를 hot-press에 넣고 80℃, 50bar 압력 하에 압축성형을 100분간 진행하였으며, 바로 이어서 복합재 내부 수지함침으로 인한 기공 발생을 감소시키기 위해 온도를 125℃로 증가시킨 후 50bar 압력 하에 100분 더 성형하였다.

2.2 PAN/Pitch CF 복합재료의 기계적 특성 평가

굴곡특성 분석: PAN계 프리프레그와 Pitch계 프리프레그를 적층하여 제작된 복합재료의 굴곡시험은 ASTM D790의 규격에 따라 Universal Testing Machine(UTM, 4467, Instron, USA)을 이용하였다. 3점굽힘시험법을 이용하여 식(1)과 같이 굴곡강도를 계산하였다.

$$S = \frac{3P_{max}L}{2bd^2} \quad \cdots\cdots (1)$$

where,

P_{max}: Load at a given point on the load-delection curve, N(lbf)

L: Support span, mm(in.)

b: Width of beam tested, mm(in.)

d: Depth of beam tested, mm(in.)

굴곡탄성률은 접선의 초기 기울기(m)을 이용하여 식(2)를 통해 계산하였다.

$$E = \frac{L^3 \cdot m}{4bd^3} \quad \cdots\cdots (2)$$

동적 물성 분석: 복합재료의 적층구조에 따른 동적 점탄성 특성을 알아보기 위해 동적물성분석기 Dynamic mechanical analyzer(DMA, Q800, TA Instruments, USA)를 이용하였다. 시편규격은 ASTM D4046에 의거하여 single cantilever mode로 측정하였고, 30mm×10mm×3mm의 크기로 제조하였다. 그 후 시험분석은 질소분위기에서 승온속도 5℃/min으로 하고 30℃~200℃까지 측정하였으며 진폭은 10μm, 시험속도는 1Hz의 속도로 진행하였다.

열팽창특성 분석: 적층구조에 따른 복합재료의 열팽창특성을 분석하기 위해 TA Instrument사의 Thermomechanical analyzer(TMA Q-400, UK)를 사용하여 측정하였다. 샘플은 ASTM E831에 근거하여 길이방향 3mm×6.4mm×3mm와 수직방향 6.4mm×6.4mm×3mm의 크기로 제조하였으며, 삽입된 복합재료 시편을 온도변화(30℃~200℃)에 따라 길이방향과 수직방향에 대한 팽창량을 관찰하였다. 이를 통해 열팽창계수(Coefficient of thermal expansion, CTE)로 환산하여 열적 치수안정성을 확인하였다.

충격특성 분석: 충격시험은 ASTM D7136에 따라 복합재료의 내충격특성을 알아보기 위해 낙추식 충격시험을 진행하였다. JCEAST 9350 시험기기를 사용하였으며, 시편은 150mm×100mm×3mm로 제작하였다. 낙추충격시험 시 다음 식(3)을 통해 충격에너지와 흡수에너지를 계산할 수 있다. 식(4)는 아래와 같이 구하였다.

$$E_i = \frac{mv_i^2}{2} \quad \cdots\cdots (3)$$

where,

E_i: Measured impact energy, J[in.-lbf]

m: Mass of impactor, kg[lbm]

v_i: Impact velocity, m/s[in./s]

$$E_a(t) = \frac{m(v_i^2 - v(t)^2)}{2} + mg\,\delta(t) \quad \cdots\cdots (4)$$

where,

E_a : Absorbed energy at time t, J[in.-l bf]

www.kci.go.kr

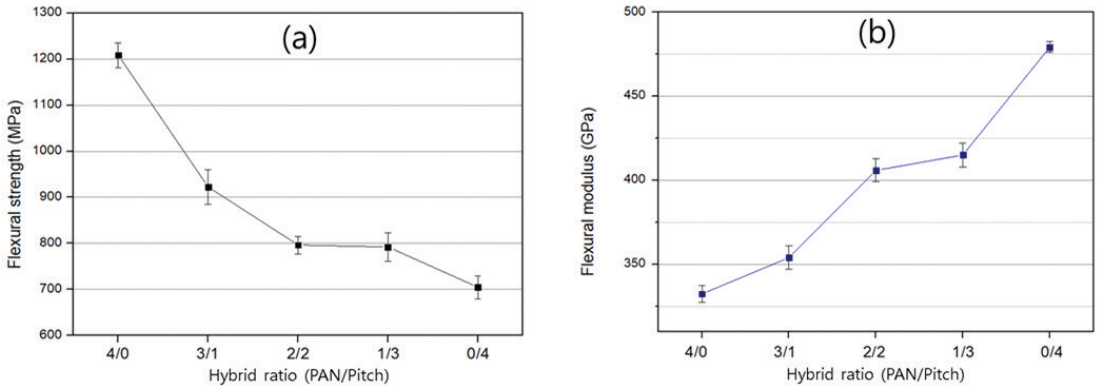

Figure 1. Flexural strength and modulus of the PAN/Pitch CF composites manufactured at different composition ratio; (a) flexural strength, (b) flexural modulus.

g: Acceleration due to gravity(9.81m/s^2)
δ : Impactor displacement at time t, m[in.]

형태학적 특성 분석: 최종적으로 제작된 시편들을 홀 가공을 하였을 때의 표면 형태학적 특성을 알아보기 위해 Digital camera(IFS-28, Canon, Japan)을 사용하였다. 이를 통해, PAN계 CF와 Pitch계 CF의 적층 구조와 함량비에 따라 발생하는 가공 결함에 대해 알아보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 굴곡특성

적층구조 조건에 따른 복합재료의 굴곡특성을 Figure 1에 나타내었다. Figure 1(a)의 굴곡강도는 Pitch계 프리프레그의 함량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 Table 2에 나타난 것과 같이 PAN계 CF와 Pitch계 CF의 특성에 따른 결과로 사료된다. 또한, Figure 1(b)의 굴곡 탄성률은 Pitch계 CF의 탄성률이 상대적으로 PAN계 CF보다 높기 때문에 Pitch계 CF의 함량에 따라 선형 비례적인 경향을 보인다.

고강도 PAN계 CF로 제조된 (4/0) 복합재는 1208±206MPa의 높은 굴곡강도를 갖는다. 하지만 (3/1) 복합재는 922±113MPa의 강도를 보이며, 급격히 강도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 복합재료를 구성하고 있는 섬유자체의 특성과 프리프레그의 섬유 및 수지의 함량차이가 기계적 특성에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 또한, 높은 탄성률을 갖는 Pitch계 CF (0/4) 복합재는 479±11GPa의 굴곡탄성률을 갖는다.

복합재 내부에 존재하는 결함이나 기공 등에 따라 복합재료의 강도와 탄성률에 영향을 미치지만, 복합재료를 구성하고 있는 섬유종류, 섬유함량, 보강구조 등에 따라 기계적 특성이 결정되며, 이에 따른 변화 폭이 큰 것으로 사료된다.

3.2 동적물성

Figure 2는 DMA분석을 통해 온도 증가에 따른 저장탄성률과 Tan δ의 변화를 나타내었다. 이는 시편의 한쪽 끝에서 진폭과 주파수를 보내어 다른 한쪽 끝에 있는 감지센서를 통해 전달된 기계적인 파동을 측정한 결과이다. 이를 통해 재료의 저장된 에너지와 손실된 에너지를 계산할 수 있고, 탄성계수의 비인 Tan δ를 구할 수 있다. 이는 저장탄성률와 손실탄성률의 비로 결정되며, 복합재료에 응력이 가해질 때 재료내의 에너지

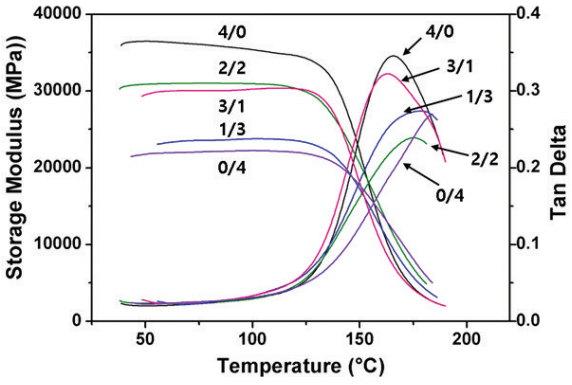

Figure 2. Storage modulus and tan δ of the PAN/Pitch CF composites at different conditions with a heating rate of 5℃/min.

www.kci.go.kr

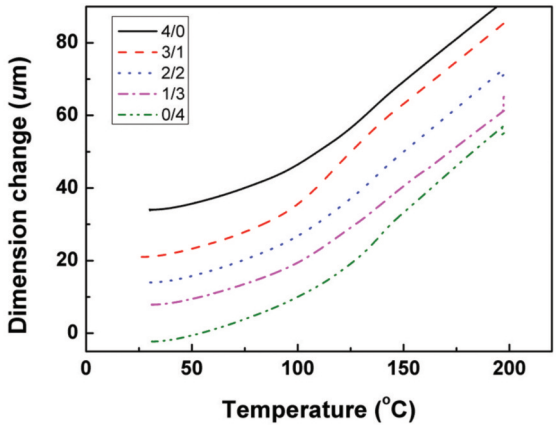

Figure 3. The dimensional stability as a function of temperature for PAN/Pitch CF composites at different conditions.

손실을 나타낸다.

복합재료의 저장탄성률은 PAN계 CF의 함량이 높을수록 높은 수치를 보여주었고, 또한 손실탄성률과 Tan δ의 비도 최댓값을 나타내었다. 하지만 PAN계 CF와 Pitch계 CF의 비가 2/2일 때, 높은 저장탄성률을 보이는 반면, 손실탄성률과 Tan δ의 수치는 가장 낮게 표시되었다. 동일한 수지를 사용한 것을 고려하면, 강화재로 사용된 소재의 변화는 열에 의한 변형의 특성에 영향을 주는 것으로 사료된다. 특히, 높은 탄성율을 가지는 Pitch계 CF의 함량에 따라 상대적으로 낮은 손실계수를 나타내며, 높은 강성의 특징을 보인다.

CF 적층구조에 따른 유리전이온도와 댐핑(Damping) 피크의 변화를 관찰하였다. 일반적으로 복합재료에서 효율적인 에너지흡수를 위해서는 우수한 수지-섬유 계면접착력이 요구되지만 섬유 자체의 특성과 수지함량의 차이로 인해 다른 영향을 줄 것으로 사료된다.

본 실험에서는 Pitch계 CF의 함량이 증가할수록 유리전이온도를 증가시키고, 댐핑 피크의 높이를 변화시켰다. 이는 Pitch계 CF 복합재가 상대적으로 온도가 가해지는 외부변형에 대해 저항이 높아 PAN계 CF 복합재보다 낮은 손실계수를 가지며, Pitch계 CF 복합재의 수지함량이 PAN계 CF 복합재의 수지함량보다 높으므로 이에 따른 결과로 사료된다.

3.3 열팽창특성

복합재료에 대한 온도상승에 따른 치수변화를 TMA를 통해 측정하였고, 이 실험의 결과는 Figure 3과

Table 4. Linear thermal expansion of PAN/Pitch CF composites after thermomechanical analysis with different hybrid ratio

Sample	4/0	3/1	2/2	1/3	0/4
Linear thermal expansion	0.606	0.529	0.500	0.467	0.458

Table 4에 나타내었다. 치수변화가 양의 값을 나타내는 것은 복합재료가 열팽창(thermal expansion)을 한다는 것을 의미한다. 오직 PAN계 CF로만 이루어진 4/0조건에서는 열팽창계수가 0.606의 값을 가지며, Pitch계 CF로 제조된 0/4 복합재료는 0.458의 값을 나타낸다. 이러한 열팽창계수는 복합재료의 열치수안정성을 간접적으로 확인할 수 있다. 복합재료 홀 가공 시 열에 의해 가공결함이 발생할 경우 열치수안정성이 중요한 요소로서 작용한다. 열로 인해, 치수 변화가 생기면 가공 후 불량한 외관이 형성되기 때문이다. 다시 말해, 치수안정성이 높을수록 가공 시 발생하는 열에 의해 변형에 대한 저항이 높다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 PAN계 CF는 상대적으로 낮은 열팽창저항성을 보여주는 반면, Pitch계 CF의 함량이 높을수록 열팽창저항성을 향상시키는데 크게 기여하고, 그리하여 가공결함의 발생을 줄이는 결과를 가져올 것으로 사료된다.

3.4 충격특성

복합재료의 각 조건에 따른 충격특성 측정 결과를 Figure 4와 Table 5에 나타내었다. Figure 4는 복합재료의 내충격성을 측정한 결과로, PAN계 CF와 Pitch계 CF의 적층 비율에 따라 시간에 따른 충격량을 나타낸 것이다. 측정된 그래프의 면적은 복합재료가 흡수한 충격에너지를 의미하며, PAN계 CF로만 적층한 (4/0) 복합재료가 가장 높은 충격흡수에너지를 나타내었다. 이는 Table 5를 통해 각 조건에 따른 복합재료 흡수에너지를 수치로 표시하였다.

실험결과 일방향으로 적층된 복합재는 다소 낮은 충격특성을 갖는 반면, 고강도 특성을 갖는 PAN계 CF의 함량이 증가할수록 복합재료의 내충격성은 향상되었고, 함량비 (4/0) 일 때 가장 큰 효과를 나타내었다. 높은 탄성률을 갖는 Pitch계 CF 복합재료는 충격특성에

www.kci.go.kr

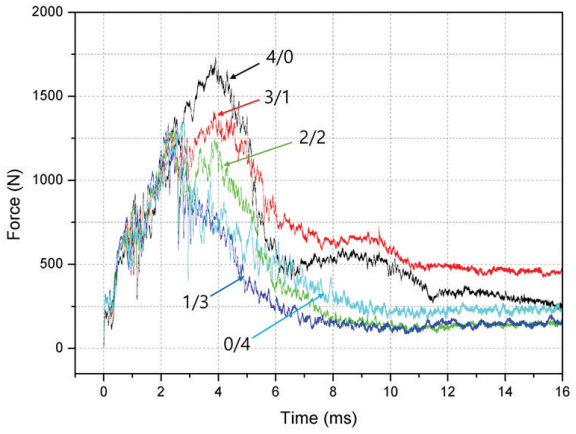

Figure 4. Impact properties of the PAN/Pitch CF composities with different hybrid ratio.

가장 낮은 결과를 보였으며, 이는 Table 2에 나타낸 각 탄소섬유의 특성에 따른 결과로 사료된다.

3.5 형태학적 특성

Figure 5는 복합재료에 대한 홀 가공 후 표면형태를 Digital camera(IFS-28, Canon, Japan)을 이용하여 관찰한 결과이다. Figure 5(a)는 고강도 PAN계 CF으로만 제조된 복합재 표면형태를 나타낸다. PAN계 CF만 사용한 복합재료와 PAN/Pitch CF 복합재료들의 두드러진 차이는 사진에서 보는 바와 같이, 가공 시 발생하는 박리, 미절삭 섬유, 섬유 뜯김과 같은 가공결함을 보여준다는 것이다. 상대적으로 누르는 힘에 대한 저항이 낮은 PAN계 CF 복합재료는 이러한 가공결함을 발생시키는 원인을 제공할 수 있다. 반면, PAN/Pitch계 CF 복합재료의 표면은 부드러운 외관을 가지며, Pitch계 CF가 복합재료의 강성을 높이는데 기여하고 가공결함을 낮추는 역할을 하는 것으로 사료된다.

Table 5. Absorbed energy of PAN/Pitch CF composites after drop weight impact test with different hybrid ratio

Sample	4/0	3/1	2/2	1/3	0/4
Impact absorbed energy (J)	10.78	9.614	6.018	5.877	5.329

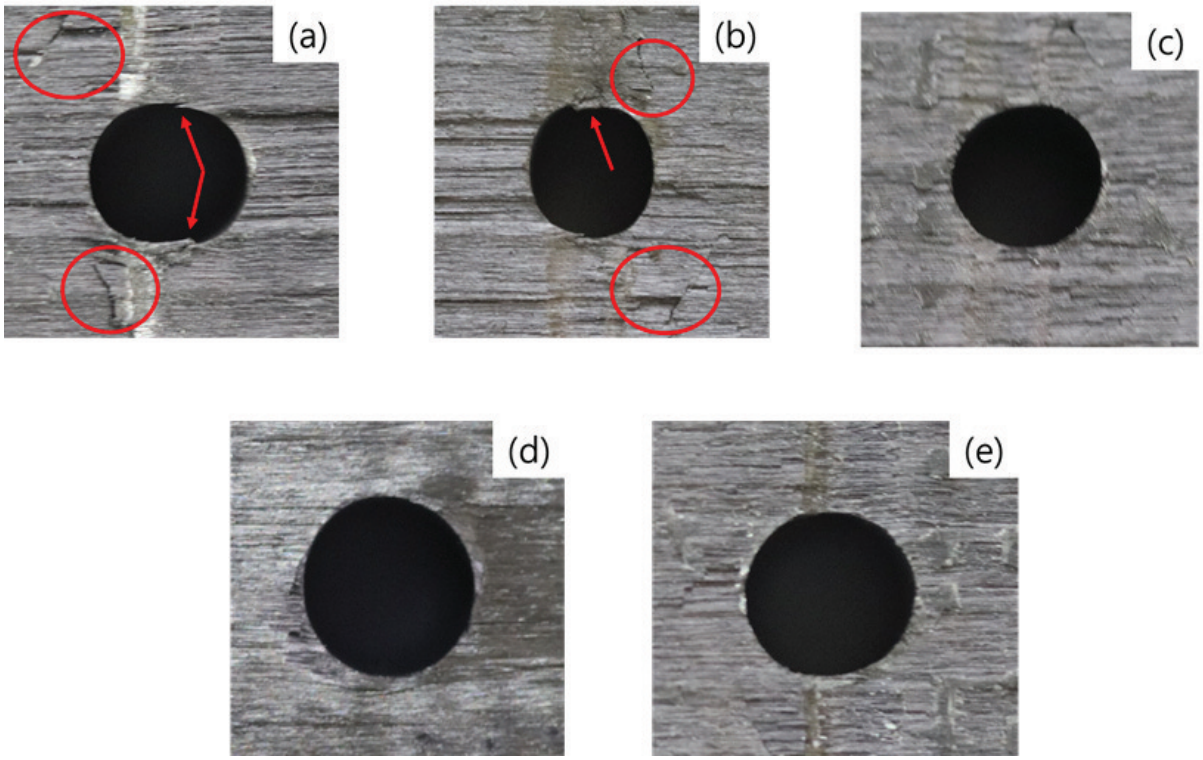

Figure 5. Morphological images of PAN/Pitch CF composites with different hybrid ratio after hole machining; (a) 4/0, (b) 3/1, (c) 2/2, (d) 1/3, (e) 0/4 at hybrid ratio.

www.kci.go.kr

가공결함이 발생하는 원인은 열에 의한 변성과 누르는 힘에 의해 생기는 변형에 기인한다. 즉, 탄소섬유 복합재 특성을 고려한 가공기술과 가공시스템도 필요하지만, 고탄성 소재인 Pitch계 CF를 사용함으로써 복합재료의 가공결함을 줄일 수 있다. 변형이 적은 고탄성 Pitch계 CF의 사용은 이러한 가공결함을 줄이는 결과를 가져오고, Figure 5(e)에 보이듯이 가공결함이 적은 외관 형태를 갖는다.

4. 결 론

본 연구에서는 고강도, 고탄성 특성을 가지는 PAN/Pitch CF 복합재료를 개발하기 위하여 적층구조를 달리하여 제조하였다. 제조된 복합재료는 굴곡특성, 동적물성, 열팽창특성, 충격특성, 형태학적 분석을 통해 가공결함제어에 응용할 수 있는 연구를 수행하였다. 최종적으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

굴곡특성 분석 결과, Pitch계 CF함량의 증가에 따라 PAN/Pitch CF 복합재료의 굴곡강도는 낮아지지만 굴곡탄성률은 향상되었다. 이는 동일한 matrix를 갖는 복합재료에서 PAN계 CF와 Pitch계 CF의 다른 특성에 따른 결과로 사료된다.

DMA 분석 결과 나타난 저장탄성률과 Tan δ의 변화를 살펴보면, PAN계 CF 복합재료는 저장탄성률이 최댓값을 나타나지만, 그만큼 손실탄성률도 가장 높은 결과를 보여주었으며 이들의 비인 Tan δ도 최대 수치를 보여주었다. 이는 강화재로 PAN계 CF 소재가 열에 의한 변형의 폭이 크다는 것을 의미한다. 하지만 높은 탄성률을 가지는 Pitch계 CF의 함량에 따라 낮은 손실계수를 보여주었으며, 높은 강성의 특성을 나타내는 것으로 사료된다.

PAN/Pitch CF 복합재료의 열팽창 특성 역시 Pitch계 CF의 함량이 증가할수록 열에 의한 변형에 저항이 높은 결과를 보여주었으며, 가공시 발생하는 변형에 대한 안정성이 높을 것으로 사료된다. 즉, Pitch계 CF는 열팽창저항성을 향상시키는데 크게 기여하고, 가공시 발생할 수 있는 결함을 제어하는 요소로서 작용될 것으로 보인다.

충격특성 분석 결과, PAN계 CF 복합재료 (4/0)가 가장 높은 충격흡수에너지를 나타내었다. 고강도 특성을 갖는 PAN계 CF 함량이 증가할수록 내충격성은 향상되었고, 반대로 높은 탄성 특성을 보이는 Pitch계 CF 복합재료는 가장 낮은 결과를 보였다. 높은 탄성을 갖는 복합재료는 소재특성상 충격특성에 취약하며 적절한 조합비를 통해 복합재료의 충격특성을 보완할 필요가 있음을 보인다.

PAN/Pitch CF 복합재료의 형태학적 특성은 홀 가공시 열에 의한 변성과 누르는 힘에 의해 생기는 변형을 관찰하였다. PAN계 CF와 Pitch계 CF의 적층순서와 함량비에 따라 홀 가공 표면형태에서 박리, 미절삭 섬유, 섬유 뜯김과 같은 가공결함을 확인할 수 있었다. 이를 통해, Pitch계 CF가 복합재료의 강성을 높이는데 기여하였고, 결과적으로 가공결함을 제어하는 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 섬유산업스트림간협력기술개발사업(과제번호 : 10076834)의 지원 및 관리로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. H. Adam, Carbon Fibre in Automotive Applications, *Mater. Design*, **18**, 349(1997).
2. S. J. Park and M. K. Seo, The Effects of $MoSi_2$ on the Oxidation Behavior of Carbon/carbon Composites, *Carbon*, **39**, 1229(2001).
3. W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. J. Wittebrood, P. D. Smet, A. Haszler, and A. Vieregge, Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry, *Mater. Sci. Eng.*, **A280**, 37(2000).
4. K. Chawla, “Fibrous Materials”, Cambridge University Press, UK, 2016.
5. K. Naito, Y. Tanaka, J. M. Yang, and Y. Kagawa, Tensile Properties of Ultrahigh Strength PAN-based, Ultra-high Modulus Pitch-based and High Ductility Pitch-based Carbon Fibers, *Carbon*, **46**, 189(2008).
6. J. Zeng, B. Saltysiak, W. S. Johnson, D. A. Schiraldi, and S. Kumar, Processing and Properties of Poly (methylmethacrylate)/carbon Nanofiber Composites, *Composites Part B: Engineering*, **35**, 245(2004).

www.kci.go.kr

7. J. B. Donnet and R. C. Bansal, “In Carbon Fibers”, Marcel Dekker, New York, 1984.
8. E. Fitzer, “Technical Status and Future Prospects of Carbon Fibres and their Application in Composites with Polymer Matrix(CFRPs), Carbon Fibers and their Composites”, Springer, Berlin, pp.3-45, 1985.
9. D. A. Cato and D. D. Edie, Flow Behavior of Mesophase Pitch, *Carbon*, **41**, 1411(2003).
10. J. P. Davim and P. Reis, Study of Delamination in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics(CFRP) using Design Experiments, *Composite Structures*, **59**, 481 (2003).
11. S. Ahmad and Y. Jamal, “Machining of Polymer Composites”, Springer, New York, 2009.
12. D. Liu, Y. Tang, and W. L. Cong, A Review of Mechanical Drilling for Composite Laminates, *Composite Structures*, **94**, 1265(2012).
13. N. Baral, P. Davies, C. Baley, and B. Bigourdan, Delamination Behaviour of Very High Modulus Carbon/epoxy Marine Composites, *Composites Science and Technology*, **68**, 995(2008).

Authors

구선웅 충남대학교 유기소재 · 섬유시스템공학과 석사과정 학생
오우진 충남대학교 유기소재 · 섬유시스템공학과 석사과정 학생
원종성 충남대학교 유기소재 · 섬유시스템공학과 박사과정 학생
이하람 충남대학교 유기소재 · 섬유시스템공학과 석사과정 학생
윤주영 우양신소재 대표이사
이승구 충남대학교 유기소재 · 섬유시스템공학과 교수

www.kci.go.kr