

항공기용 스트링거 제작을 위한 브레이드 복합재료의 물성에 관한 연구

은종현* · 이준석*[†] · 박승환* · 김동현* · 천진성** · 유호욱**

A Study on the Mechanical Properties of Braid Composites for the Manufacture of Aircraft Stringer

Jong Hyun Eun*, Joon Suck Lee*[†], Seung Hwan Park*, Dong Hyun Kim*,
Jin Sung Chon**, Ho Wook Yoo**

ABSTRACT: In this paper, we have studied the physical properties of braided composites for use as aircraft stringers. Process variables such as drum winder speed, braid velocity, and mandrel diameter for 30°, 45° and 60° braid preforms were quantified and different epoxy resin types were applied to the braided preform using TGDDM, YD-128. Physical properties such as tensile strength and flexural strength of braided composites were investigated. Thermal properties and decomposition temperature of epoxy resin were investigated by TGA analysis. As a result, the lower the angle of the braid composites, the higher the tensile strength and the Flexural strength. The physical properties of braided composites fabricated using TGDDM epoxy resin were superior to the physical properties of braided composites fabricated using YD-128 epoxy resin. This is because the molecular weight of TGDDM epoxy resin was higher than that of YD-128 epoxy resin.

초 록: 본 논문에서는 항공기용 스트링거(Stringer)로 사용하기 위한 브레이드 복합재료(Braided composites)의 물성에 대해 연구하였다. 브레이드 프리폼(braid preform)을 30°, 45°, 60°로 제작하기 위해 드럼 와인더 속도, 브레이드 속도, 멘드럴 직경과 같은 공정변수들을 정량화시켰고, 에폭시 수지 종류를 TGDDM, YD-128로 브레이드 프리폼에 다르게 적용하여 각도에 따른 브레이드 복합재료의 인장강도, 굽힘강도를 섬유부피분율에 따라 규명하였으며, TGA 분석으로 열적 특성과 에폭시 수지의 분해 온도를 조사하였다. 그 결과 브레이드 프리폼의 각도가 낮을수록 인장강도와 굽힘강도가 향상됨을 확인하였고, 분자량이 높은 에폭시 수지를 사용할 때 물리적 성질이 향상되었다.

Key Words: 탄소섬유(Carbon fiber), 복합재료(Composite materials), 브레이드(Braid), 에폭시(Epoxy), 압축성형(Compression molding)

1. 서 론

최근 모든 산업분야에서 기존의 소재와 비교하여 우수한 기계적 특성과 기능적 특성을 요구하는 새로운 소재에 대한 필요성이 점점 증가하고 있다. 탄소섬유는 탄성계수

와 강도가 크고, 전기 및 열전도도가 높으며, 피로, 부식, 마찰, 마모 특성 및 화학적 안정성이 우수한 장점이 있다. 이러한 탄소섬유의 장점을 이용하여 제조되는 복합재료는 높은 비강도, 경량성, 내피로성, 내약품성, 그리고 고탄성률 등을 가진 소재로서 자동차 및 스포츠 용품, 군사용품, 항

Received 30 October 2017, received in revised form 15 October 2018, accepted 30 October 2018

*Department of Fiber System Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

[†]Department of Fiber System Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea, Corresponding author (E-mail: leejs@ynu.ac.kr)

**Department of Composite Materials R&D Center, Textile for Life (T4L), Gyeongsan 38474, Korea

공, 건축자재 및 선박 등의 산업에 폭 넓게 이용되고 있는 유망한 신소재이다[1].

탄소섬유 강화복합재료(Carbon fiber reinforcement plastic)에서 강화재로 사용되는 탄소섬유 프리폼으로는 2D-직물, 3D-직물, Non-Crimp fabric, 필라멘트 와인딩 공법, 브레이드 공법 등과 같은 다양한 형태가 있으며, 특히 브레이드 공법은 둘 또는 그 이상의 종류의 실이 일체형(net shape) 구조를 형성하도록 사선방향으로 교차시키는 것으로 다축섬유 구조 프리폼을 제조 할 수 있고, 예리한 곡률을 가지는 복잡한 형태의 구조물을 제작 할 수 있다. 브레이드 구조물은 형성되는 과정에서 직물 또는 편물과는 매우 다르며, 복합재료로 제작했을 때 고인성, 내피로성, 내충격성, 구조보지성과 같은 우수한 물리적 성질을 가진다[2,3].

현재 항공기의 주 구조물 중 동체 및 날개 구조로서 가장 많이 사용하는 세미 모노코크 구조(semi monocoque structure)는 외피와 뼈대가 같이 하중을 담당하는 구조로 정역학적으로 부정정 구조물에 해당한다. 세미 모노코크 구조의 구성은 수직 방향 부재인 벌크헤드(bulkhead), 정형재(former), 링(ring), 프레임(frame)이 있으며, 세로 방향 부재로는 세로대(longeron), 세로지(stringer)가 사용되고 있다. 그 중에서도 스트링거의 역할은 세로대보다 단면적이 적어 무게가 가볍고 훨씬 많은 수를 배치하며 주로 외피의 형태에 맞추어 부착하기 위해서 사용되며 외피의 좌굴(buckling)을 방지하기 위하여 사용되기 때문에 물리적인 특성에 대한 요구가 크다.

이와 관련해 국외에서는 스트링거에 요구되는 물리적인 특성과 양산성을 만족시키기 위해서 브레이드 복합재료의 적용에 대한 검토를 진행하고 있으며, 이미 다수의 연구가 보고되었다. Amit G. Salvi[4]는 2D 3축 브레이드 프리폼으로 탄소복합재료를 여러 각도에 따라 제작하고 그에 따른 압축 응력과 계면 전단 강도에 대해 연구하였고, Paul J. Falzon과 Israel Herszberg[5]는 인장, 전단 및 압축 시험과 같은 2D 브레이드 탄소복합재료의 기계적 성능을 평가하였다. Pedro와 Willden[6]은 2-D 3축 브레이드와 3-D 브레이드 탄소복합재료의 기계적 성질을 연구하였으며, Stephen R. Swanson과 Lloyd V. Smith[7]는 2-D 브레이드 탄소복합재료 시험편의 강도를 측정하기 위한 일련의 2축 시험결과를 제시하였다. 이 외에도 브레이드 탄소 복합재료의 브레이드 각도에 따른 물리적 성질과 관련하여 많은 수의 연구가 보고되고 있고[8-13], 브레이드 복합재료의 항공기 부품 적용에 관한 연구도 진행되고 있지만[6,14], 국내에는 브레이드 복합재료 그 중요성에 비해 보고된 연구가 많지 않다. 또한 브레이드 각도에 따른 연구는 다소 많은 편이나, 기지재에 따른 브레이드 복합재료의 성질에 대해 조사한 연구는 보고된 바가 없어, 그것과 관련된 연구가 필요하다.

본 연구는 2차원 형상의 3축 브레이드 프리폼을 각도별로 설계 및 제작하고, 이를 이용해 분자량이 다른 에폭시 수

지(Epoxy resin)로 복합재료를 제작 한 후, 섬유부피분율, 브레이드 각도, 기지재의 특성이 항공용을 사용될 탄소섬유 강화 복합재료의 물리적 특성과 열적 특성에 미치는 영향에 대하여 알아보려고 한다.

2. 실험

2.1 재료

본 연구의 복합재료 시험편을 제작하기 위하여 사용한 강화재로는 탄소섬유(TANSOME 24K, (주)효성)를 사용하였고, 기지재로는 2가지 종류의 분자량이 다른 에폭시 수지(YD-128, TGDDM, (주)국도화학)를 사용하였으며, Table 1, 2에 탄소섬유와 에폭시 수지의 특성을 나타내었다.

2.2 브레이드 프리폼 제작

브레이드 프리폼의 제조는 (주)티포엘의 48추 브레이드 장비(TFB 48)를 사용하여 제작하였다. 브레이드사를 공급하는 48개의 캐리어(Carrier)에 탄소섬유를 위치시키기 위하여 TANSOME의 24K 탄소섬유 패키지로부터 브레이드 전용 보빈(bobbin)으로 감은 후, 캐리어에 위치시켰고, 축방향의 탄소섬유를 맨드릴(Mandrel)과 평행하게 배열시켰다. 드림와인더 속도(Take-up speed), 브레이드 속도, 맨드릴 직경과의 상관관계를 고려하여 30°, 45°, 60° 각도를 가지는 브레이드 프리폼을 제작하였고, 제작 모식도와 2D tri-axial 브레이드 장비를 Fig. 1에 나타내었으며, Table 3에 각도에 따른 브레이드 프리폼의 제작 조건을 정리하였다.

2.3 복합재료의 제작

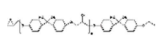
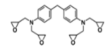
브레이드 각도와 에폭시 수지에 따른 복합재료의 물리적 특성을 알아보기 위하여 복합재료를 제작하였다. 에폭시 수지는 TGDDM과 YD-128을 다르게 사용하였고 열압 성형 방법을 통해 복합재료를 제작하였다.

TGDDM을 이용한 복합재료 성형의 경우 주재(TGDDM)

Table 1. The properties of carbon fiber

| Fiber type | Number of filaments | Tensile strength | Tensile modulus | Elongation | Density |
|------------|---------------------|------------------|-----------------|------------|------------------------|
| H2550 | 24000(24K) | 5,516 MPa | 250 GPa | 2.2% | 1.80 g/cm ³ |

Table 2. Chemical structures and M.W of epoxy matrices

| Resin type | Product name | Chemical structure | M.W (g/mol) | Company |
|--------------------------------|--------------|---|-------------|-----------------|
| Bisphenol-A type | YD-128 |  | 340.49 | Kukdo Co. Korea |
| Methylene dianiline (MDA) type | TGDDM |  | 422.7 | |

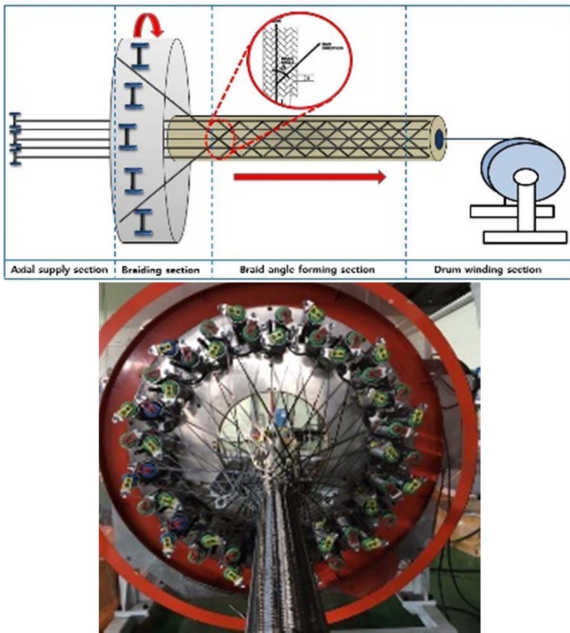


Fig. 1. Manufacturing process schematic diagram of Braid preform and T4L 2D tri-axial braid machine

Table 3. Braid Preform manufacturing conditions

| Braid angle | Winder speed (mm/min) | Braiding speed (RPM) | Carbon fiber width (mm) | Mandrel Diameter (mm) |
|-------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| 30 | 900 | 30 | 6 | 48 |
| 45 | 900 | 40 | 6 | 65 |
| 60 | 900 | 54 | 6 | 89 |



Fig. 2. Hot press forming equipment

과 경화제(M-MIPA)를 6:4 비율로 혼합하여 브레이드 프리폼에 핸드레이업 방법으로 함침시킨 후 진공 오븐을 이용하여 80°C, 15분, 0.95 기압에서 수지를 탈포시켰다. 그 후 180°C의 온도로 10분간 Dwell time을 주어 점도를 떨어트렸고, 40분 동안 10 MPa로 가압하여 복합재료를 성형하였다.

YD-128을 이용한 복합재료 성형의 경우 주재(YD-128)과 경화제(H-4065)를 4:1 비율로 혼합하여 브레이드 프리폼에 핸드레이업 방법으로 함침시킨 후 진공 오븐을 이용하여

80°C, 15분, 0.95 기압에서 수지를 탈포시켰다. 그 후 80°C의 온도로 10분간 Dwell time을 주어 점도를 떨어트렸고, 40분 동안 10 MPa로 가압하여 복합재료를 성형하였고 그 장비의 사진을 Fig. 2에 나타내었다.

2.4 섬유부피분율 측정

브레이드 각도와 에폭시 수지에 따른 탄소섬유강화 복합재료의 섬유부피분율을 측정하기 위하여 ASTM D-3171 규격을 인용하였다. 800°C에서 10°C/min의 heating rate로 10 시간동안 질소분위기에서 에폭시 수지를 열분해시켰고, 복합재료의 밀도는 ASTM D-792에 따라 아르키메데스의 원리를 이용하여 측정하였다.

2.5 인장강도 측정

브레이드 각도와 에폭시 수지에 따른 탄소섬유강화 복합재료의 인장성질을 알아보기 위하여, ASTM D-3039 규격을 기준으로 만능재료시험기(UNITECH-M)를 이용하여 측정하였다. 시험편의 폭은 25 mm, 길이는 250 mm, 두께는 2.3 mm로 제작하였으며, Gage length는 175 mm, Cross-head speed는 2 mm/min으로 5회씩 측정하였으며 실험 과정을 Fig. 3에 나타내었다.

$$F^{tu} = P^{max} / A \tag{1}$$

이때, F^{tu} : 인장강도, MPa

P^{max} : 파단하중, N

A : 평균단면적, mm²

2.6 굽힘강도 측정

브레이드 각도와 에폭시 수지에 따른 탄소섬유강화 복합재료의 굽힘실험은 ASTM D-790 규격을 기준으로 만능



Fig. 3. Tensile test procedure of braided carbon/epoxy composites



Fig. 4. Flexural test procedure of braided carbon/epoxy composites

재료시험기(OTT-00-series)를 이용하여 측정하였다. 시험편의 폭은 25 mm, 길이는 100 mm, 두께는 3.125 mm로 제작하였으며, Span length는 50 mm, Cross-head speed는 1 mm/min으로 5회씩 측정하였으며 실험 과정을 Fig. 4에 나타내었다.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

이때, σ_f : 굽힘강도, MPa
 P : 파단하중, N
 L : Span length, mm
 b : 시험편의 폭, mm
 d : 시험편의 두께, mm

2.7 TGA 측정

에폭시 수지에 따른 탄소섬유강화 복합재료의 열적특성과 분해온도를 알아보기 위하여, TGA분석을 진행하였다. 50°C에서 900°C까지 10°C/min의 heating rate로 시험편의 질량감소율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 브레이드 복합재료의 섬유부피분율 측정

브레이드 프리폼으로 제작한 복합재료의 물리적 특성에 대한 명확한 기준을 위해 섬유부피분율을 측정하였다. 2차원 브레이드 장비는 실제 형태의 복합재료 프리폼을 제조할 수 있는 장점을 가지고 있다. 맨드릴을 사용하면 복합재료 형태의 프리폼이 형성되고 섬유부피분율은 사용된 브레이드 섬유의 배향각과 섬유가 차지하는 부피에 의하여 결정된다. 섬유부피분율은 주어진 브레이드 프리폼의 단면에 있는 전체 실의 면적에 의하여 결정되며 아래의 식 (3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$A_m = A_y \times N_y / \cos\theta \quad (3)$$

여기에서, A_m : 브레이드 프리폼의 단면적
 A_y : 브레이드사의 단면적

Table 4. Fiber volume fraction of braided composites

| Carbon fiber | Braid angle | Fiber volume fraction (TGDDM resin) | Fiber volume fraction (YD-128) |
|--------------|-------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| TANSOME 24K | 30° | 54 | 53 |
| | 45° | 55 | 54 |
| | 60° | 58 | 57 |

N_y : 브레이드사의 개수

θ : 맨드릴축에 대한 브레이드사의 배향각

그러므로 브레이드 복합재료의 섬유부피분율은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_f = A_m / A_c \quad (4)$$

여기에서, V_f : 섬유부피분율

A_c : 복합재료의 단면적

A_m : 브레이드 프리폼의 단면적

위의 식 (4)을 섬유부피분율과 브레이드 각도에 대해 다시 정리하면

$$V_f = A_m / A_c \quad (5)$$

식 (5)와 같으며, 이는 브레이드 각도가 증가할수록 섬유부피분율이 증가함을 나타낸다.

30°, 45°, 60°로 제작한 브레이드 복합재료를 800°C 온도에서 10시간동안 열처리함으로써, Epoxy resin을 태웠고, 복합재료의 밀도를 측정하였으며, $V_f = \frac{W_f W_{total}}{\rho_f \rho_{total}} \times 100$ 으로 섬유부피분율을 측정된 결과를 Table 4에 나타내었다. 측정결과 브레이드 각도가 증가할수록 섬유부피분율이 증가하였으며, 약 55% 정도 값을 나타내었다.

3.2 브레이드 복합재료의 인장강도

브레이드 각도와 에폭시 수지를 다르게 하여 브레이드 복합재료를 제작하였고, 인장강도 실험을 통해 물리적 특

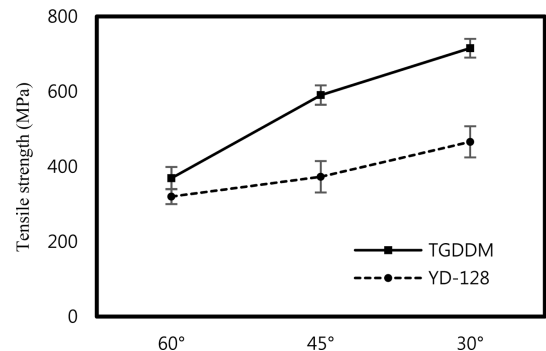


Fig. 5. Tensile strength of the braided composites

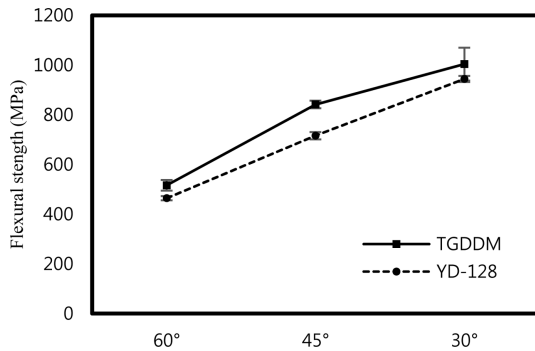


Fig. 6. Flexural strength of the braided composites

성을 확인하였다. 그 결과 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 분자량이 높은 TGDDM 수지(422.7 g/mol)를 사용하였을 때, 분자량이 낮은 YD-128 수지(340.49 g/mol) 보다 전체적으로 강도가 높게 나왔으며, 이는 상대적으로 높은 분자량의 수지에 의해 인장강도가 향상되었음을 의미한다. 또한 브레이드 각도가 낮을수록 인장강도가 증가하는 경향을 보이는데 이는 섬유 배열이 인장방향과 유사한 섬유 축방향으로 방향으로 배열되어 시험편이 파괴되는데 더 많은 하중이 요구되기 때문이라 사료된다.

3.3 브레이드 복합재료의 굽힘강도

브레이드 각도와 에폭시 수지 다르게 하여 브레이드 복합재료를 제작하였고, 굽힘강도 실험을 통해 물리적 특성을 확인하였다. 그 결과 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 분자

량이 높은 TGDDM 수지(422.7 g/mol)를 사용하였을 때, 분자량이 낮은 YD-128 수지(340.49 g/mol) 보다 전체적으로 강도가 높게 나왔으며, 브레이드 각도가 감소할수록 굽힘강도가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 섬유의 배열이 90° 보다 0°에 가까울수록 굽힘하중에 대한 저항성이 높아졌기 때문이며, 분자량이 높은 수지로 인해 복합재료가 더 강화되었기 때문이라 사료된다.

3.4 브레이드 복합재료의 열적 특성

브레이드 복합재료의 각도와 에폭시 수지가 복합재료의 열적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 TGA 측정을 통해 온도에 따른 질량 감소율을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 측정 결과, 대체적으로 분자량이 높은 TGDDM 수지의 경우 400°C 이상에서 분해가 일어나기 시작했고, 분자량이 낮은 YD-128의 경우 400°C 이하에서 분해가 일어난 것으로 보아, TGDDM으로 성형한 복합재료가 내열성이 더 우수함을 확인하였다. 또한 잔류중량의 경우에도 TGDDM 에폭시 수지로 성형한 복합재료가 더 높았고, 60~70%의 잔류중량을 나타내는 것은 탄소섬유의 존재를 나타내는 것으로 분해는 에폭시 수지에서 일어난 것을 확인할 수 있다. 각도에 따른 중량감소율은 크게 차이를 보이지 않았는데, 탄소섬유 복합재료에서의 열적 특성은 강화재보다 기지재의 성질에 더 많은 영향을 받는다는 사실을 확인하였다.

4. 결론

본 논문은 브레이드 프리폼의 각도와 에폭시 수지를 다르게 하여 항공기용 스트링거로 사용하는데 적합한 브레이드 복합재료의 물성에 대해 연구하였다. 다양한 각도에 따른 브레이드 프리폼 설계에 대한 드립와인더 속도, 브레이드 속도, 맨드릴 직경과 같은 공정 변수들을 정량화 시켰으며, 분자량이 다른 에폭시 수지를 이용하여 열압 성형 방법으로 복합재료를 성형 한 후, 브레이드 각도와 에폭시 수지가 복합재료의 인장강도, 굽힘강도와 같은 물리적 특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 그 결과, 브레이드 각도가 낮을수록 복합재료의 인장강도가 증가하였고, TGDDM 에폭시 수지의 분자량이 YD-128 에폭시 수지의 분자량 보다 높아 전체적으로 높은 인장강도 값을 나타내었다. 이러한 양상은 굽힘시험에서도 유사하게 TGDDM 에폭시 수지로 제작한 복합재료의 굽힘강도가 YD-128 에폭시 수지로 제작한 복합재료의 굽힘강도보다 높게 나왔다. 이는 TGDDM 에폭시 수지의 분자량이 YD-128 에폭시 수지의 분자량보다 높았기 때문에 굽힘강도가 증가한 것으로 사료된다. 또한 TGA 분석으로 브레이드 복합재료의 열적 특성에 대해 조사하였으며, TGDDM 에폭시 수지로 복합재료를 성형하였을 때, 열적 특성이 향상되었는데, 이는 분자량이 높은 에

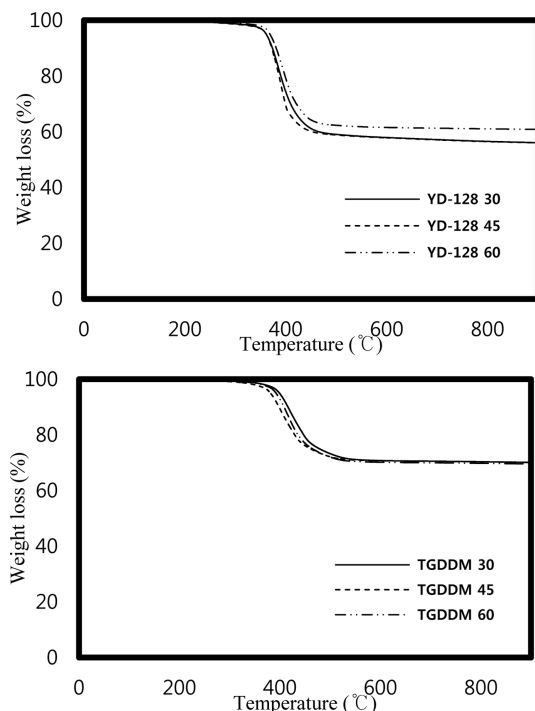


Fig. 7. TGA weight loss curves of the braid composites

폭시 수지를 사용하였기 때문에 에폭시 수지를 분해하는데 더 많은 에너지가 소비되었기 때문이라 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 글로벌전문 기술개발사업(10070173)에 의해 수행되었으며, 지원에 대해 감사 드립니다.

REFERENCES

1. Morgan, P., *Carbon Fibers and Their Composites*. Boca Raton: Taylor and Francis, New York, U.S, pp. 121-184, 2005.
2. Roy, S., and Potluri, P., "Braiding: from cordage to composites," The 3rd textile research conference, Dhaka, Bangladesh, Oct. 2016, pp. 12-15.
3. Branscomb, D., Beale, D., and Broughton, R., "New directions in braiding," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, Vol. 8, Issue 2, 2013, pp. 11-24.
4. Salvi, A., "Rate dependent compressive response of 2D tri-axially braided carbon fiber composites and the effects of resin on the interfacial shear strength," *Composites Part A*, Vol. 40, 2009, pp. 19-27.
5. Falzod, P., and Herszberg, I., "Mechanical performance of 2-D braided carbon epoxy composites" *Composites Science and Technology*, Vol. 3538, 1998, pp. 253-265.
6. Fedro, M., and Willden, K., "Characterization and manufacture of braided composites for large commercial aircraft structure," NASA CP 3154 – 2nd Advanced Technology Conference, U.S, Sep. 1991, pp. 387-429.
7. Swanson, S., and Smith, L., "Comparison of the biaxial strength properties of braided and laminated carbon fiber composites." *Composites Part B*, Vol. 27, Issue 1, 1996, pp. 71-77.
8. Tate, J., and Kelkar, A., "Stiffness degradation model for biaxial braided composites under fatigue loading," *Composites Part B*, Vol. 39, Issue 3, 2008, pp. 548-555.
9. Zheng, Y., Sun, Y., Li, J., et al. "Tensile response of carbon-aramid hybrid 3D braided composites," *Materials and Design*, Vol. 116, 2017, pp. 246-252.
10. Roy, S., and Soutis, C., "A study of quadriaxial and triaxial composites tubes developed by braid winding," International Conference on Composites Materials, Canada, Montreal, 2013, pp. 7895-7903.
11. Zhou, L., and Zhuang, Z., "Strength analysis of three dimensional braided T-shaped composite structures," *Composites Structure*, Vol. 104, pp. 162-168.
12. Xiao, X., Kia, H., and Gong, X., "Strength prediction of a tri-axially braided composite." *Composites Part A*, Vol. 42, Issue 8, 2011, pp. 1000-1006.
13. Zhang, M., Sun, B., and Gu, B., "Accelerated thermal ageing of epoxy resin and 3D carbon fiber/epoxy braided composites," *Composites Part A*, Vol. 85, 2016, pp. 163-171.
14. Uozumi, T., Kito, A., and Yamamoto, T., "CFRP using braided preforms RTM process for aircraft applications," *Advanced Composite Materials*, Vol. 14, Issue 4, 2005, pp. 365-383.