

Triaxial braiding 기술을 이용한 원형 튜브의 횡방향 저속충격파괴 거동분석

Transverse Low Velocity Impact Failure Behavior of Triaxial Braided Composite Tube with Different Braiding Angles

*Corresponding author

Ji-hyun Sim
maxwell02@dyetec.or.kr

심지현*, 박성민, 김지혜, 신동우, 천진성¹, 김재관¹, 배진석²
다이텍연구원, ¹(주)티포엘, ²경북대학교 섬유시스템공학과

**Ji-hyun Sim*, Sung-min Park, Ji-hye Kim, Dong-woo Shin, Jin-sung Chon¹,
Jae-kwan Kim¹ and Jin-Seok Bae²**

Korea Dyeing and Finishing Technology Institute(DYETEC), Daegu Korea

¹*Department of Composite Materials R&D Center, Textile for Life (T4L), Gyeongsan, Korea*

²*Department of Textile System Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea*

Received_October 07, 2016
Revised_November 18, 2016
Accepted_December 14, 2016

Abstract In comparison to metal alloys, braided composite features a high impact resistance and crash energy absorption potential, and also it still remained competitive stiffness and strength properties. Braiding angle is one of the most important parameters which affect the mechanical behaviors of braided composite. This paper presents transverse low velocity impact failure behavior analysis on the carbon 3D Triaxial braided composite tube with the braiding angle of 20°, 50° and 80°. The flexural behaviour of 3D triaxial braided composite tube under bending loads was studied by conducting quasi-static three point bending test. Also, the low velocity impact responses of the braided composite tubes were also tested to obtain load-displacement curves and energy absorption. Consequently, the increase of the braided angle, the peak load also increases owing to the bigger bending stiffness.

Textile Coloration and Finishing

TCF 28-4/2016-12/246-252

©2016 The Korean Society of
Dyers and Finishers

Keywords *triaxial braided composite, braiding angle, transverse impact, failure behavior, composite tube*

1. 서 론

탄소섬유강화복합재료는 비강도와 비강성이 우수한 재료로서 기존의 금속재료에 비해 낮은 밀도, 우수한 피로성능, 환경적인 안정성 등의 우수하기 때문에 항공, 국방, 자동차, 스포츠 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다²⁾. 특히 최근 들어 복합재료는 자전거와 같은 스포츠 용품 제작에 많이 활용되고 있는데, 과거에 마그네슘이나 알루미늄으로 제작되던 자전거 프레임은 복합재료를 사용하여 제작되는 경향이 증가하고 있다¹⁾. 기존의 탄소섬유강화복합재료로 제조되는

자전거 프레임은 일반적인 등방성(isotropic) 재료와는 달리 적층판의 방향과 적층 순서에 따라 그 구조적 안정성 및 충돌 에너지 흡수 형상 등 다양한 연구들이 진행되었다.

하지만 최근 자전거는 단순한 이동 수단을 넘어서 많은 사람들이 즐기는 스포츠 산업의 한 축으로 성장하여 크게 늘어난 산업적 수요로 인해 기존의 핸드레이업 방식의 자전거 프레임 제조 방식은 한계가 있다. 이러한 제조 방식을 대신하여 효율적인 자동화 제조 방식으로 인한 비용 절감 및 다양한 프리폼 형상(preform design)을 구현할 수 있는 3차원 직조방법인 braiding

기술을 이용한 자전거 프레임 제조기술 및 성형기술이 주목받고 있다³⁻⁵⁾.

그 동안 CFRP 소재를 적용한 3D 형상의 자전거 프레임 튜브를 구상하는 Triaxial braiding 기술은 유한 요소해석을 활용하여 복합재 강도에 영향을 미치는 브레이딩 각도, 셀의 크기, 형상 두께 등 다양한 요소들을 고려한 연구가 진행되어 왔으며, 특히 최근에는 이러한 브레이딩 구성요소들에 대한 축방향 압축 거동 및 충격에 대한 손상 및 변형거동에 대한 연구가 진행되었다⁶⁾. 전방 또는 후방 충돌에 의한 압축 하중에 따른 자전거 프레임 튜브의 충격손상이 구조적으로 중요하지만, 측면 충돌에 의한 횡방향 하중에 의한 자전거 프레임 충격 손상에 대한 연구를 진행할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 각도로 제조된 브레이드 프리폼을 액상수지주입 성형을 통하여 자전거 프레임 튜브를 제조하고, 횡방향 충격에 의한 자전거 프레임 튜브의 손상을 관찰하기 위해 정적인 시험인 braid 각도에 따른 횡방향 충격 손상 및 파괴거동을 분석하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

본 연구에서 원형 브레이드 튜브를 제작에 있어 강화섬유로 사용되는 탄소섬유는 12K의 TORAYCA®(T700SC, Toray, Japan)를 사용하였으며, 매트릭스로는 Infusion/RTM 성형공법을 위해 제조된 에폭시 수지 및 경화제(SCI-L500R/H, Shin-A T&C, Korea)를 100:15.2 당량비로 혼합하여 사용하였고 수지에 대한 정보는 Table 1과 같다.

Table 1. Typical properties of epoxy resin

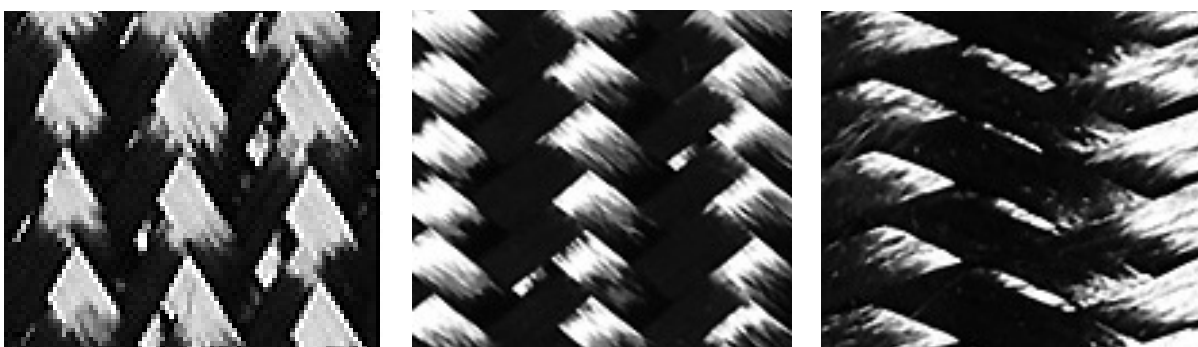
Properties	RTM resin (SCI-L500R/H)
Mixing ratio of epoxy/hardener	100.0g/15.2g
Viscosity of mixture(cps/25°C)	1,339 cps
Geltime(120°C)	1 min 34 sec
Glass transition temperature(°C)	127.5
Potlife(25°C, min)	98.3
Exothermic peak temp.(°C)	212.5

2.2 브레이드 프리폼의 제조

탄소섬유의 부피분율이 40%가 되도록 조절하였으며, 32개의 캐리어를 가진 원형 브레이드기를 사용하여 캐리어의 회전속도와 mandrel 권취속도의 차이에 의해 Figure 1과 같은 브레이드 각(braid angle) 20, 50, 80도인 원형의 braid 직물을 제조하였다. 브레이드에서 축방향의 강도를 향상시키기 위하여 브레이딩 제조시 중심사(axial yarn)를 삽입하였고, 제조된 Triaxial braided preform을 자전거 프레임 제조용 금형에 설치한 후 RTM(Resin Transfer Molding)성형을 실시하였다. 에폭시 수지의 기포를 제거한 후 수지를 주입하고, 금형을 140°C에서 10분 동안 Figure 2과 같은 프로세스로 성형하여 3D 원형 브레이드 튜브 형상의 시편을 제조하였다.

2.3 브레이드 프리폼의 특성 평가

braid 각도에 따른 횡방향의 굽힘 특성을 알아보기 위해 SHIMADZU사의 AG250KN을 이용하여 ASTM D 7264 규격을 준용한 3점 굽곡 실험(3-point bend-



(a) Braiding angle : 20°

(b) Braiding angle : 50°

(c) Braiding angle : 80°

Figure 1. 3D braided composite specimen with braiding angle.

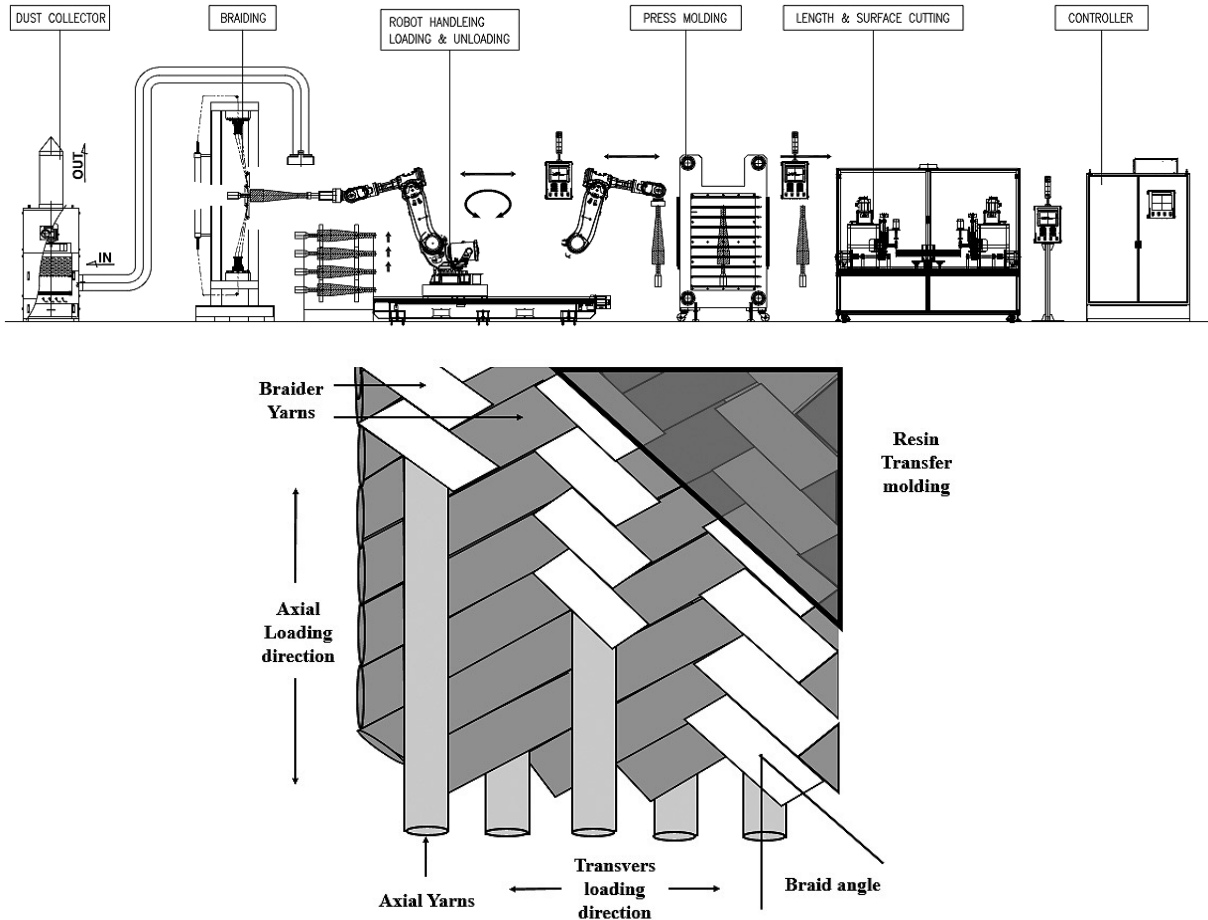


Figure 2. Schematic diagram of braiding process and RTM process.

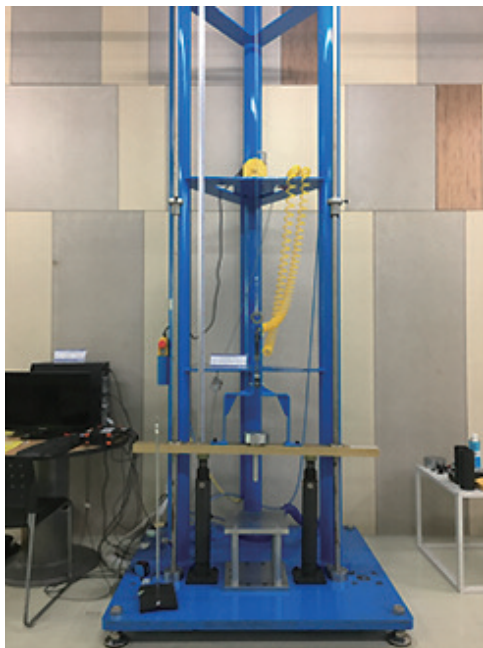


Figure 3. Drop impact machine setup.

ing)을 실시하였다. 튜브 모양의 시험편이 지그에 미끄러지는 현상을 최소화하기 위하여 초기하중 10N을 부과한 후에 crosshead speed 2mm/min의 속도로 정적 굽곡 실험을 진행하였다. 또한 파괴된 시험편의 단면과 측면을 관찰하기 위해 SEM 및 광학현미경을 사용하여 파괴형상을 관찰하였다.

3D braided composite tube의 낙하충격시험은 Figure 3의 ACT Drop test 시험기(SIRIUSi 8xSTGM (SIRIUSi-STG8-M), T-one Solution Co., Ltd., Korea)를 이용하였고, 충격속도에 의한 시험편 변위(DT50-N113, SICK, USA)를 측정하기 위한 센서를 장착하여 낙하충격에 의한 재료의 관성 효과(inertial effect)분석 및 복합재료 구조물의 균열 또는 손상 후 하중-변위 곡선 변화를 분석하는 시험법인 ASTM D 3763-02 규격에 의거하여 진행하였다.

충격자(impactor)의 직경은 500mm로써 충격자의 끝은 둥근 반구 형태를 사용하였으며, 충격자의 무게

Table 2. Geometrical parameters of 3D braided composite tubes

Braiding angle (°)	Inner diameter (mm)	Thickness (mm)	Fiber volume fraction (%)
20	27.8	1.73	42.8±0.5
50	27.5	1.85	44.7±0.8
80	28.1	1.95	46.5±1.2

및 높이를 조절하여 충격 속도와 충격에너지를 조절하였다. 기계적 물성 평가 후의 파단면 분석은 SEM(SU 3500, HITACHI, Japan)을 통해 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Braid 각도에 따른 굴곡강도 변화

제조된 3D braided composite에 대한 굴곡강도 시험 전에 제조된 적층 복합재료의 부피 분율 측정은 ASTM D3171-06 규격에 준하여 실시하였으며, 측정된 결과를 Table 2에 나타내었다.

$$V_f = \left(\frac{V_f}{M} \right) \times \frac{P_c}{P_f} \times 100 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$V_m = \frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times \frac{P_c}{P_f} \times 100 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$V_u = 100 - (V_f - V_m) \quad \dots\dots\dots(3)$$

V_f : fiber volume percent, %

V_m : volume percent of matrix in specimen

V_u : void volume, %

M_i : initial mass of the specimen

M_f : final mass of the specimen after digestion or combustion

P_c : desity of the specimen

P_f : density of the reinforcement

Figure 4는 braid 각도에 따른 3D braid composite tube의 횡방향 굴곡강도 결과를 나타낸 것이다. 중심사와 브레이드사 간의 교차 각도가 20도인 3D braid composite tube 시편의 경우, 축방향의 섬유와의 교차각도가 작기 때문에 횡방향의 하중에 의해 초기 강도 값이 153MPa로 작게 나타난 반면에, braid 각도가 80도인 3D braid composite tube는 축방향의 섬유와의 교차각도가 크기 때문에 횡방향의 하중에 대한 최대 강도 값이 20도나 50도에 비해 약 30% 높은 199.6MPa의 값을 나타냈다. 이는 braid 각도가 커질 수록 braider yarn의 수가 증가하면서 횡방향 더 많은

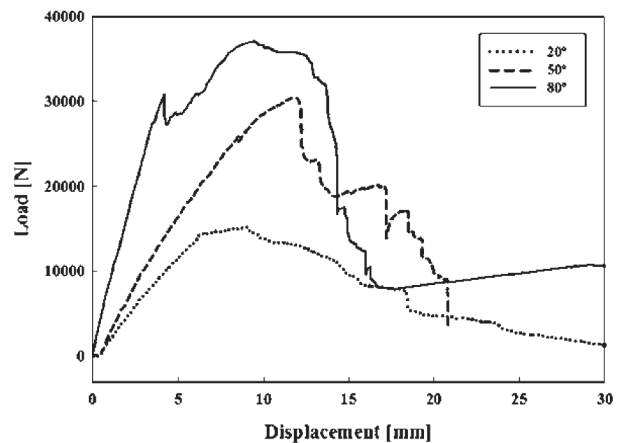
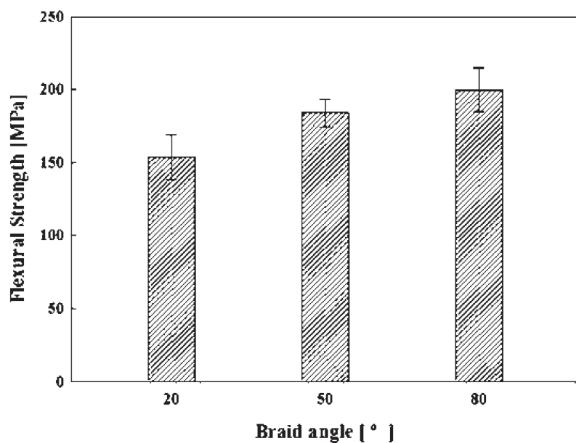


Figure 4. Flexural strength test with various braiding angle.

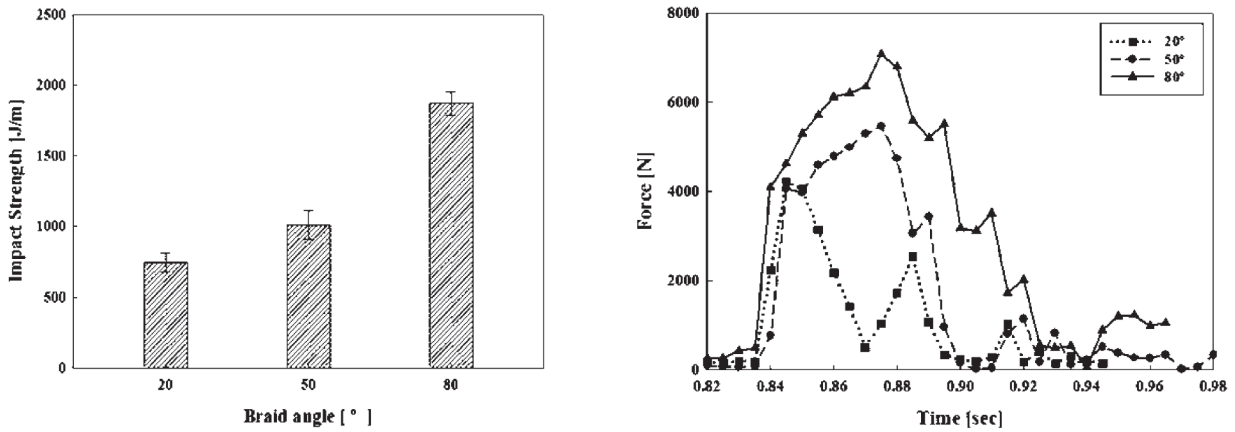


Figure 5. Drop impact test with various braiding angle.

하중을 견딜 수 있게 된 것으로 생각된다. 또한 20도와 50도 브레이딩 튜브에서는 관찰되지 않았던 초기 강도 저하 부분은 섬유-섬유사이에 수지가 고르게 침투되지 않아 매트릭스로 사용된 수지부분에서 균열이 시작되는 것에 의해 발생한 peak로 보인다. braid 각도가 증가할수록 braider yarn이 더 촘촘히 감기게 되어 braid yarn의 수가 증가되며 이로 인해 튜브의 동일 면적 당 수지가 침투할 수 있는 공간이 좁아지게 되므로 수지의 침투가 어려운 것으로 판단되며, 그래프를 통해 braid 각이 80도인 경우 이러한 현상이 발생한 것으로 보인다⁶⁻⁸⁾.

3.2 Braid 각도에 따른 낙하충격강도

낙하충격강도 시험은 braid 각도에 따른 3D braid composite tube 세 종류의 시편에 대하여 6.2m/s의 속도로 실험을 진행하였다.

Figure 5는 충격파괴 거동을 분석하기 위한 곡선으로 충격에 의한 첫 번째 crack 및 damage 발생 이후에도 multiple peak와 multiple slope가 나타나는 것을 관찰할 수 있었는데, 이는 섬유강화복합재료의 충격 파괴 거동을 잘 나타내어주고 있다. 충격자가 자유낙하하면서 시편에 받은 충격량에 대한 분석 결과를 보면, braid 각도가 높아질수록 변위-하중 곡선의 아래 부분의 넓이가 넓어짐을 알 수 있는데, 이것은 충격에 의한 에너지를 3D braid composite tube가 흡수한 상대적인 에너지의 양으로 볼 수 있다.

Braid 각도에 따른 충격에너지는 각각 744, 1011, 1870J/m로 증가하는 경향을 나타냈다. 앞선 굴곡 실험에서와 마찬가지로 중심사와 브레이드사 간의 교차 각도가 20도인 경우에 비해 50도인 경우는 약 35%, 80도인 경우에는 약 60% 가량 충격흡수 에너지가 증가하는 경향이 나타났다^{9,10)}.

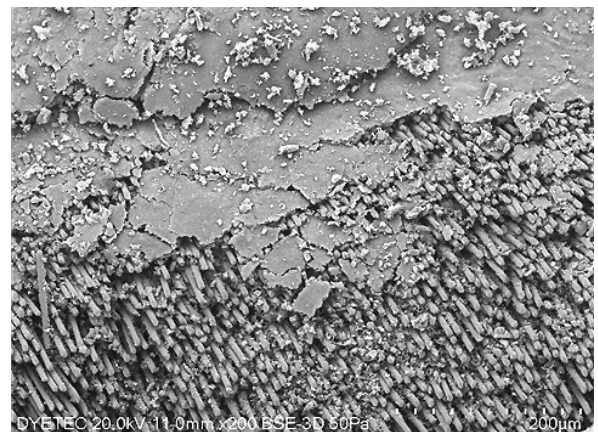


Figure 6. SEM image of the cross-section of 3D braided composite tube.

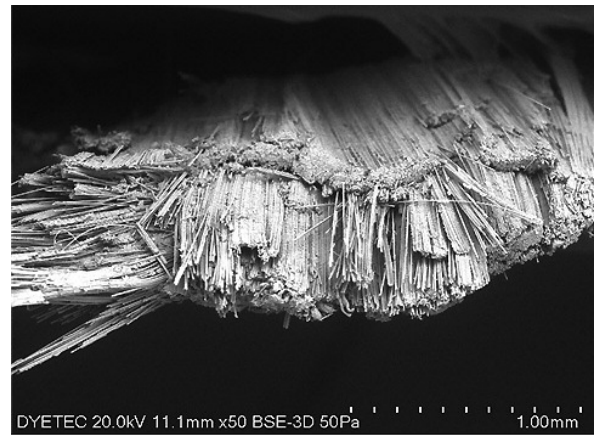


Figure 7. SEM image of the failure morphology of 3D braided composite tube.

3.3 파괴현상 분석

Figure 6은 굴곡 시험 중 3D braided composite tube의 손상 정도를 알아보기 위해 SEM 분석 결과를 나타낸 것이다. 중심사와 braider yarn 사이의 계면 또는 수지 부분에서 발생하는 균열의 모양과 수를 분석한 결과, 3D braided composite tube의 파괴현상은 굽힘 하중에 의한 국부적인 응력으로 복합재료 시편에서 섬유와 매트릭스 사이의 계면 박리(matrix crazing)와 섬유 끝단 계면 박리(fiber-end interfacial debonding), 중간 휨 균열로 인한 분열과 층간분리(intermediate flexural crack-induced interlaminar debonding), 균열 성장과 섬유파괴 및 pull-out 현상이 진행되었으며, 최종적으로 시편 관통 및 파괴가 진행되었다^{11, 12)}.

Figure 7은 낙하충격시험 후 3D braided composite tube 단면을 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 충격자에 의한 낙하충격 시험 후 파괴된 시편의 단면을 확인한 결과 매트릭스에서 섬유가 pull-out 되는 현상이 관찰되었다. 또한 직접적인 충격이 가해진 부분 이외의 시편에서는 외력에 의한 시편의 좌굴(buckling)현상으로 좌굴응력이 매트릭스로 전달되어 braider yarn bundle 사이에서 crack 발생 및 진보되는 현상이 관찰되었으며, braid 각도가 증가할수록 3D braided composite tube의 길이 방향으로 crack의 길이가 증가되었다^{4, 6)}. 이러한 현상은 3D braided composite tube의 각도가 커질수록 횡방향의 하중에 의한 좌굴 응력이 증가함에 따라 나타난 결과로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 braid 각도를 서로 다르게 조절한 3D braid composite tube의 정적인 횡방향 굴곡시험과 동적인 낙하충격시험을 진행한 결과로써 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

1. 굴곡강도 분석을 통하여 중심사와 브레이드사 간의 교차 각도가 20도인 3D braid composite tube 시편보다 80도인 3D braided composite tube는 축방향의 섬유와의 교차각도가 크기 때문에 횡방향의 하중에 대한 최대 강도가 약 30% 높은 199.6MPa의 값을 나타내었다.
2. Quasi-static 굴곡시험을 통하여 braided composite tube의 파괴현상을 관찰하였으며, 실험 결과 첫 번째 crack 및 damage 발생 이후에도 multiple peak와 multiple slope가 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 파괴 mechanism은 매트릭스 크레이징과 섬유 끝단 계면 박리, 중간 휨 균열로 인한 분열과 층간분리, 균열 성장과 섬유파괴 및 pull-out 현상이 진행되었으며, 최종적으로 시편 관통 및 파괴가 진행되었다.
3. 자유낙하충격시험을 통하여 충격에 의한 에너지를 3D braid composite tube가 흡수한 상대적인 에너지를 평가한 결과 중심사와 브레이드사 간의 교차 각도가 80도인 3D braid composite tube 시편이 약 60%의 충격 흡수에너지가 증가하는 경향이 나타

났다. 또한 외력에 의한 시편의 좌굴에 의해 매트릭스로 응력이 전달되어 braider yarn bundle 사이에서 crack이 전달되어 delamination되는 현상이 관찰되었으며, braid 각도가 증가할수록 3D braided composite tube의 길이 방향으로 crack의 길이가 증가되었다. 이것은 3D braided composite tubed의 각도가 커질수록 횡방향의 하중에 의한 좌굴응력이 증가함에 따라 나타난 결과로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 2015년 중소기업공동연구실지원사업(N0001663)의 연구비 지원으로 수행되었음.

References

1. M. Zhang, B. Sun, and B. Gu, Accelerated Thermal Aging of Epoxy Resin and 3-D Carbon Fiber/Epoxy Braided Composites, *Composites: Part A.*, **85**, 163 (2016).
2. K. H. Tsai, C. H. Chin, and T. H. Wu, Fatigue Behavior of 3D Multi-layer Angle Interlock Woven Composite Plates, *Composite Science and Technology*, **60**, 241 (2000).
3. H. Zhou, W. Zhang, T. Liu, B. Gu, and B. Sun, Finite Element Analyses on Transverse Impact Behaviors of 3-D Circular Braided Composite Tubes with Different Braiding Angles, *Composites: Part A.*, **79**, 52(2015).
4. R. Sturm and F. Heieck, Energy Absorption Capacity of Braided Frames under Bending Loads, *Composite Structures*, **134**, 957(2015).
5. R. Parimala and D. B. Jabaraj, A Study on Nanophased Biaxial Carbon Braided Composites, *Materialstoday Proceedings*, **3**, 2268(2016).
6. S. C. Quek, A. M. Waas, K. W. Shahwan, and V. Agaram, Failure Mechanics of Triaxially Braided Carbon Composites under Combined Bending-compression Loading, *Composite Science and Technology*, **66**, 2548 (2006).
7. M. Miron, H. Katzinger, S. Neudorfer, E. Pitz, and Z. Majoria, Mechanical Testing and Numerical Predictions of the Behavior of Braided Carbon Fiber Components, *Procedia Structural Integrity*, **2**, 3593(2016).
8. Z. H. Tan, B. Jia, B. J. Pang, and B. Z. Gail, The Effect of Braid Angle on the Dynamic Response of 3-D Four Direction Carbon/Epoxy Braid Composites at High Strain Rates, *Structures Under Shock and Impact*, **IX**, 137(2006).
9. Y. Shinyama, Y. Hatsukade, S. Tanaka, Y. Takai, M. S. Aly-Hassan, A. Nakai, and H. Hamada, Prediction of Initiation Site of Destruction of Flat Braided Carbon Fiber Composites using HTS-SQUID Gradiometer, *Physics Procedia*, **36**, 150(2012).
10. Y. Hatsukade, K. Yoshida, T. Kage, Y. Takai, M. S. Aly-Hassan, A. Nakai, H. Hamada, and S. Tanaka, Visualization of Flowing Current in Braided Carbon Fiber Reinforced Plastics using SQUID Gradiometer for Non-destructive Evaluation, *J. of Physics: Conference Series*, **433**, 1(2013).
11. D. K. Seo, N. R. Ha, J. H. Lee, H. G. Park, and J. S. Bae, Property Evaluation of Epoxy Resin based Aramid and Carbon Fiber Composite Materials, *Textile Coloration and Finishing*, **27**(1), 11(2015).
12. J. M. Park, Y. G. Park, Y. H. Lee, D. J. Seo, J. H. Lee, and H. D. Kim, Properties of Randomly Oriented Chopped E-glass Reinforced Unsaturated Polyester based Resin Composite, *Textile Coloration and Finishing*, **27**(3), 165(2015).