

샤르피 충격시험과 잔류 굽힘강도 평가를 통한 CFRP 복합재의 충격특성에 관한 연구

윤동환* · 최재혁* · 황민성* · 최진호*†

A Study on the Impact Characteristics of CFRP Composites by Charpy Impact Test and Residual Bending Strength Evaluation

Dong-Hwan Yoon*, Jae-Hyuk Choi*, Min-Seong Hwang*, Jin-Ho Choi*†

ABSTRACT: Carbon fiber composites are inherently vulnerable to impact due to the brittleness of the matrix and the macroscopic interface characteristics between the fiber and matrix. For composite structures such as wind turbine blades and robotic arms, which are subject to dynamic bending loads, it is critical to assess both the absorbed energy and the residual bending strength. In this study, a Charpy three-point bending impact test was conducted to investigate the damage and residual bending strength characteristics of the composite specimens. The results showed that the absorbed energy was superior in unidirectional fiber composites compared to fabric composites, and that aluminum, which has a larger plastic deformation region, exhibited higher absorbed energy values than composite materials. The minimum impact energy required for failure was approximately 10.6% higher in unidirectional fiber composites compared to fabric composites, which closely correlated with a similar increase in absorbed energy (10.2%). Additionally, the maximum load during the impact showed a trend similar to the static bending failure load and exhibited values higher than the static bending failure load.

초 록: 탄소섬유 복합재는 기지재(Matrix)의 취성과 섬유와 기지재 사이의 경계면을 갖는 특성으로 인하여 충격에 취약한 성질을 가지는 단점이 있다. 풍력 블레이드, 로봇암 등과 같은 복합재 구조물은 굽힘하중이 동하중의 형태로 작용하며 이에 대한 흡수에너지 및 굽힘 잔류강도 평가는 매우 중요하다. 본 논문에서는 샤르피 3점 굽힘 충격시험을 수행하여 복합재 시편의 손상정도와 잔류 굽힘강도 특성에 대한 연구를 수행하였다. 충격시험 결과, 흡수에너지는 페브릭 복합재보다 일방향 섬유 복합재가 우수하였으며, 소성구간이 큰 알루미늄 소재는 복합재 소재보다 흡수에너지가 높은 값을 나타냄을 확인하였다. 파손이 발생하는 최소 충격에너지는 페브릭 복합재보다 일방향 섬유 복합재의 최소 충격에너지가 약 10.6% 증가되었음을 볼 수 있었으며, 이는 흡수에너지 증가(10.2%)와 매우 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 충격하중 시의 최대하중은 정적 굽힘 파손하중과 매우 유사한 경향을 보이며, 정적 굽힘 파손하중보다 높은 값을 나타내었다.

Key Words: 샤르피 충격시험(Charpy impact test), 흡수에너지(Absorbed energy), 파손 하중(Failure load), 잔류 강도(Residual strength)

1. 서 론

복합재료는 매우 뛰어난 기계적 물성으로 인하여 경량 구조물에 주로 사용되고 있으나, 탄소섬유 및 에폭시 기지(Matrix)의 취성과 거시적으로 경계면을 갖는 특성으로 인하여 충격에 취약한 성질을 갖는 단점이 있다. 충격손상은 탄환과 같은 고속충돌과 유지 보수 중 공구 낙하와 같은 저속 충격으로 나눌 수 있는데, 충격손상이 발생할 때 복합재의 강성 및 압축강도가 크게 저하되는 것으로 알려져 있다. 복합재의 손상허용에 관한 연구는 대부분 충격 후 압축 강도 변화 특성에 대한 연구[1-6]가 대부분이고 굽힘강도 변화에 대한 연구는 부족한 상황이다. 풍력 블레이드, 로봇 암 등과 같은 복합재 구조물은 굽힘하중이 동하중의 형태로 작용하며 이에 대한 굽힘 잔류강도 평가는 매우 중요하다.

Amaro[7], Kim[8] 등은 평판형 시편에 반구형 충격체로 충격을 가하여 손상 특성을 평가하고, 시편을 빔(Beam) 형상으로 절단하여 굽힘 잔류강도 특성을 평가하였다. Zhang[9]은 빔과 평판의 중간($140 \times 40 \text{ mm}^2$) 정도의 형상을 가진 시편에 충격하중을 가하여 ESPI법으로 손상영역을 평가하였으며, 3점 굽힘시험으로 잔류강도를 측정하였다. Rotem[10]은 탄소/에폭시와 유리/에폭시 적층판을 낙하추 방식으로 3점 충격 굽힘시험을 수행하고, 잔류 강도를 3점 굽힘시험으로 평가하였다. Chenghong 등[11]은 세 가지 섬유(아라미드, 유리, 현무암)로 제작된 일방향 적층판에 충격하중을 가하여 잔류 굽힘강도 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 이상의 연구에서 보는 바와 같이 복합재 빔 구조물이 굽힘에 의한 충격을 받을 때 구조물의 손상정도와 충격 후 굽힘 잔류강도에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 샤르피 3점 굽힘 충격시험을 수행하여 시편의 손상정도와 잔류 굽힘강도 특성에 대한 연구를 수행하였다. 일방향 및 패브릭 탄소섬유 소재와 알루미늄 소재의 샤르피 충격시편을 제작하였으며, 소재에 따른 충격흡수능력과 최대하중을 평가하였다. 또한, 충격에너지에 따른 시편의 파손정도를 균열길이와 굽힘 잔류강도 측정을 통하여 평가하였다.

2. 시편 제작

샤르피 3점 굽힘시험을 수행하여 시편의 손상정도와 잔류 굽힘강도 특성을 살펴보기 위하여 복합재 빔 형태의 시편을 제작하였다. Fig. 1은 시편의 형상을 나타낸 그림으로 시편의 치수는 $120 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 5.6 \text{ mm}$ 이고 Span Length는 100 mm 이다.

시편 제작에 사용된 소재는 T700 일방향 섬유, T700 패브릭, T300 패브릭, 알루미늄 등으로, 각 소재의 특성은 Table 1에 정리되어 있다.

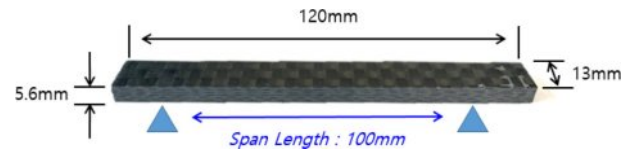


Fig. 1. Shape of impact test specimen

Table 1. Material type and thickness

Material	Fiber	Type	Area weight	Nominal thickness
T700 UD	T700 (12K)	Uni-Direction	200 g/m ²	0.23 mm
T700 Fabric	T700 (12K)	Plain Weave	400 g/m ²	0.46 mm
T300 Fabric	T300 (3K)	Plain Weave	200 g/m ²	0.3 mm
Aluminum	Al 6061			5.6 mm



Fig. 2. Closed mold for RTM

Table 2. Number of ply for each specimen

No.	Model	T700 UD	T700 Fabric	T300 Fabric
1	CU700	24	0	0
2	CUW700	12	6	0
3	CW700	0	12	0
4	CW300	0	0	24
5	Al6061	Aluminum		

시험에 사용한 수지는 국도화학(주)의 Epoxy KFR-5121과 Hardener KFH-9581LV로서, 1:1 무게비로 교반하여 사용하였다. 패널 제작 시 RTM공정을 사용하였으며, 사용된 Closed Mold는 Fig. 2에 나타나 있다. 시편 종류는 총 5가지로서, 각 시편의 적층 수는 Table 2에 나타나 있다. Table 2에서 보는 바와 같이, CU700은 T700 일방향 섬유만으로 구성되어 있으며, CUW700은 일방향 섬유와 패브릭이 1:1의 비율로 혼합되어 있고, CW700과 CW300은 패브릭으로만 구성되어 있다. 각 시편들의 두께는 모두 5.6 mm로서, 동일한 섬유 부피분율을 가지도록 제작되었다.

3. 굽힘시험 및 충격시험

복합재 시편 굽힘 충격특성을 평가하기 위하여 3점 굽힘 시험과 샤르피 충격시험을 수행하였다. Fig. 3은 3점 정적 굽힘시험 모습을 나타낸 그림으로, Instron사의 5582 만능 재료시험기를 사용하였다. Fig. 4는 굽힘 시험 결과를 나타낸 그림으로, 일방향 T700 시편(CU700)의 굽힘 파손하중이 가장 높았으며, Al 6061 시편의 굽힘 파손하중이 가장 낮음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 충격시험 모습을 나타낸 사진으로, Instron사의 dynatup 충격시험기를 사용하였다. 복합재 시험편의 충격 흡수능력을 평가하기 위하여 15J의 에너지를 가하였으며,



Fig. 3. 3-point bending test

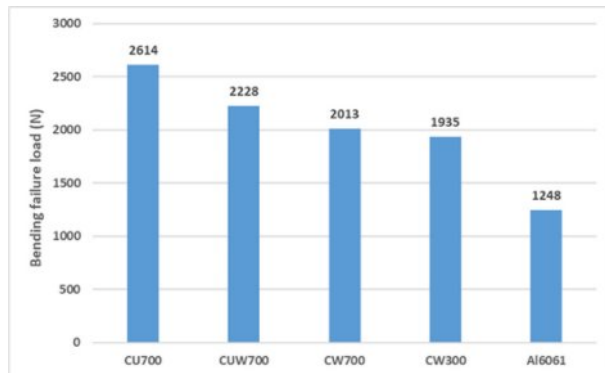


Fig. 4. Failure load of 3-point bending test

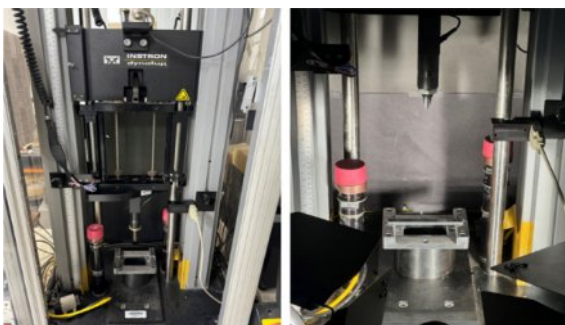
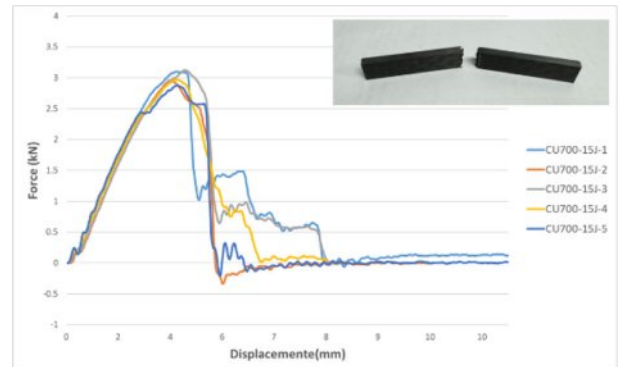


Fig. 5. Photo of the impact test

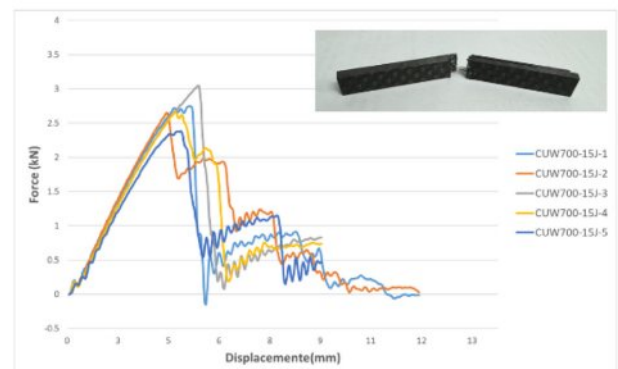
질량이 6.67 kg인 충격자를 수직으로 낙하시켜 2.12 m/s의 속도로 충격시험을 수행하였다.

Fig. 6은 15J의 충격시험에서 측정한 하중-변위 그래프와 결과와 파손 형상을 나타낸 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이, 충격시험 후 복합재는 중앙부위가 모두 파단된 모습을 볼 수 있으나 알루미늄은 파단은 되지 않고 잔류변형이 발생된 모습을 볼 수 있다.

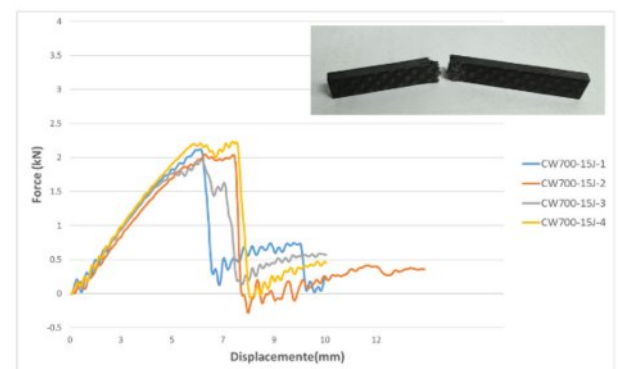
Fig. 7은 시편의 흡수에너지를 나타낸 그래프로, 흡수된



(a) CU700-15J

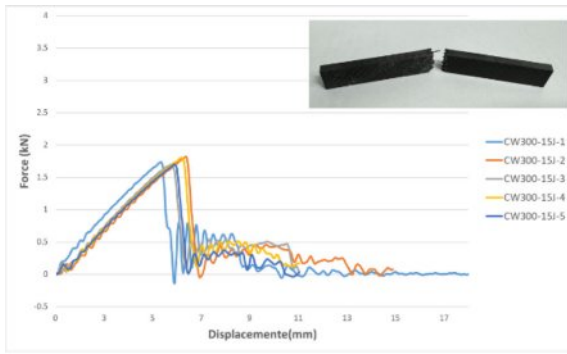


(b) CUW700-15J

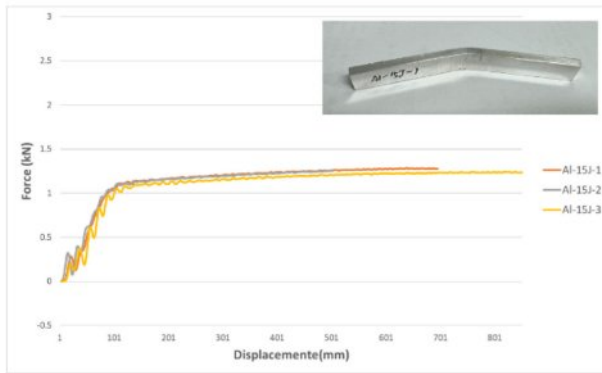


(c) CW700-15J

Fig. 6. Force-Displacement curve and fracture photo after 15J impact test



(d) CW300-15J



(e) Aluminum-15J

Fig. 6. Continued

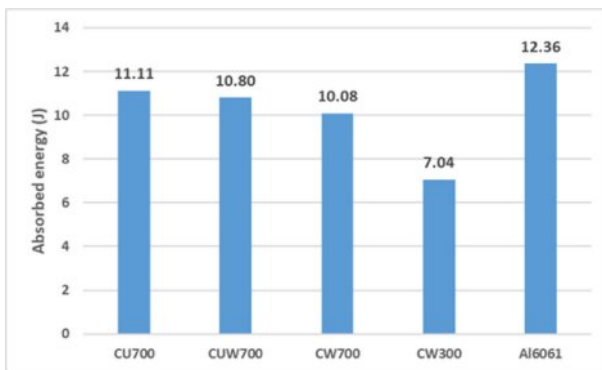


Fig. 7. Absorbed energy after 15J impact test

에너지는 하중-변위 선도에서 면적을 합산하여 평가하였다. 그림에서 보는 바와 같이 Al 6061 소재의 흡수에너지가 가장 높게 나타났고, 패브릭 복합재(CW700)보다 일방향 섬유 복합재(CU700)의 흡수에너지가 약 10.2% 증가되었음을 볼 수 있다.

Fig. 8은 충격하중 시의 최대하중을 비교한 그래프로써, T700 일방향 섬유 복합재(CU700)의 최대하중이 가장 높은 값을 가지며, 알루미늄의 최대하중이 가장 낮은 값을 보여 흡수에너지와는 다른 경향을 나타내었다. 이는 복합재는

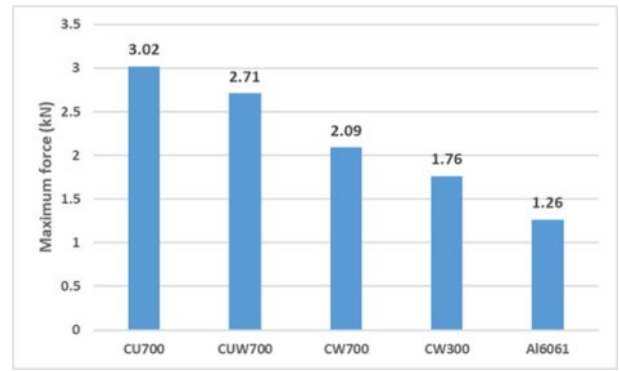
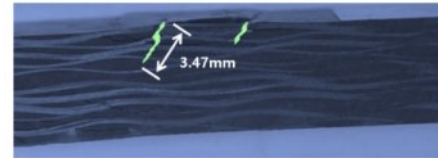


Fig. 8. Maximum force during 15J impact test



(a) Photograph of the specimen after spraying fluorescent liquid



(b) Measurement of crack length

Fig. 9. Measurement of crack length by the penetration test (CU700, 7.3J)

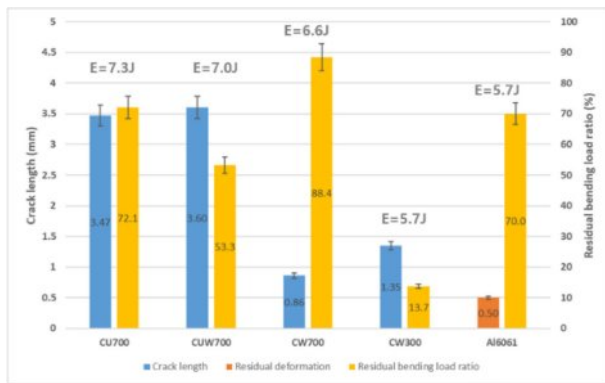
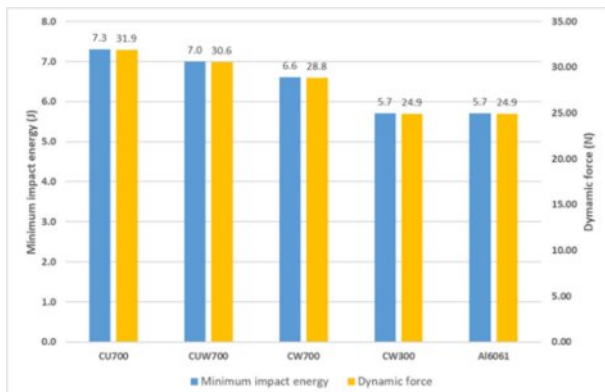
최대하중 이후 하중이 급격히 감소하는 반면, 금속은 넓은 소성 영역을 가지고 있기 때문에 판단된다. 또한, 일방향 섬유 복합재(CU700)의 최대하중은 패브릭 복합재(CW700)보다 약 44.3% 높은 값을 보이나, 흡수에너지는 상대적으로 낮은 증가폭(약 10.2%)을 보였다. 이는 충격하중 시 일방향 섬유 복합재 시편의 변형율이 패브릭 복합재 시편보다 낮은 값을 가지기 때문으로 사료된다. 또한 충격하중 시의 최대하중은 Fig. 4의 정적 굽힘 파손하중과 매우 유사한 경향을 보이며, 정적 굽힘 파손하중보다 높은 값을 나타낼 수 있다.

충격하중 하에서 파손이 발생하는 최소 충격에너지를 평가하기 위하여, 충격에너지를 상승시켜가며 시편의 파손여부를 평가하였다. 시편의 파손여부는 침투탐상법에 의한 균열길이 측정과 잔여 굽힘하중 평가를 통하여 판정하였다. Fig. 9(a)는 침투탐상시험을 위해 전용 용액을 분사한 사진이고 Fig. 9(b)의 경우 균열길이를 측정한 사진으로, CU700 시편에 7.3J의 충격에너지를 가했을 때 약 3.47 mm의 균열이 측정되었다. Table 3은 각 시편에 충격에너지를 증가시켜 가며 균열길이와 잔여 굽힘하중을 평가한 결과이다. 잔

Table 3. Crack length and residual bending load

Impact energy		5.7J	6.6J	7.0J	7.3J	7.7J
CU700	Crack length (mm)	N	N	N	3.47	F
	Residual load (N)	N	N	N	1885.2	F
CUW700	Crack length (mm)	N	N	3.60	F	F
	Residual load (N)	N	N	1187.4	F	F
CW700	Crack length (mm)	N	0.86	F	F	F
	Residual load (N)	N	1780.0	F	F	F
CW300	Crack length (mm)	1.35	F	F	F	F
	Residual load (N)	265.0	F	F	F	F
Al6061	Crack length (mm)	0.50	F	F	F	F
	Residual load (N)	873.1	F	F	F	F

N : No Damage / F : Failure

**Fig. 10.** Crack length and residual bending load ratio at minimum impact energy**Fig. 11.** Minimum impact energy and dynamic force to generate the initial crack ($v = 2.12$ m/sec)

여 굽힘하중을 정적 굽힘 파손하중으로 나눈 값을 잔여 하중비로 정의하여 Fig. 10에 나타내었다. Table 3과 Fig. 10에서 보는 바와 같이, CU700은 7.3J, CUW700은 7J, CW700은 6.6J, CW300과 Al6061은 5.7J에서 균열과 잔류 굽힘하중 저하가 발생하여 파손이 발생되었음을 확인할 수 있다.

이상의 결과를 종합하여, 파손이 발생하는 최소 충격에너지지를 나타내면 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 보는 바와 같이, 파손이 발생하는 최소 충격에너지는 패브릭 복합재(CW700)보다 일방향 섬유 복합재(CU700)의 최소 충격에너지가 약 10.6% 증가되었음을 볼 수 있으며, 이는 Fig. 7의 흡수에너지 증가(10.2%)와 매우 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 Al6061 금속소재의 최소 충격에너지는 복합재보다 낮은 값을 보여 흡수에너지와의 유사성이 부족한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 샤르피 3점 굽힘 충격시험을 수행하여 소재에 따른 충격흡수능력과 최대하중을 평가하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 굽힘 충격시험에서 흡수에너지는 패브릭 복합재보다 일방향 섬유 복합재가 우수하였으며, 소성구간이 큰 알루미늄 소재는 복합재 소재보다 흡수에너지가 높게 나타났다.
2. 파손이 발생하는 최소 충격에너지는 패브릭 복합재(CW700)보다 일방향 섬유 복합재(CU700)의 최소충격에너지가 약 10.6% 증가되었음을 볼 수 있었으며, 이는 흡수에너지 증가(10.2%)와 매우 유사한 경향을 나타내었다.
3. 충격시험 시의 최대하중은 강성이 우수한 일방향 섬유 복합재(CU700)가 패브릭 복합재(CW700)보다 높게 나타났다.
4. 충격하중 시의 최대하중은 정적 굽힘 파손하중과 매우 유사한 경향을 보이며, 정적 굽힘 파손하중보다 높은 값을 나타내었다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00397400).

REFERENCES

1. Demakos, C.B., "Stress Fields in Fiber Reinforced Laminate Beam Due to Bending and Torsion Moment," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 22, No. 5, 2023, pp. 399-494.

2. Abrate, S., "Impact on Composite Structures," *Cambridge University Press*, 1998.
3. Khondker, O.A., "Measurements and Prediction of the Compression-after-impact Strength of Glass Knitted Textile Composites," *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.35, No. 2, 2004, pp. 145-157.
4. Sanchez-Saez, S., Barbero, E., Zaera, R., and Navarro, C., "Compression After Impact of Thin Composite Laminates," *Composite Science and Technology*, Vol. 65, No. 13, 2005, pp. 1911-1919.
5. Suh, Y.W., Woo, K.S., Choi, I.H., Kim, K.T., and Ahn, S.M., "Analysis of Low Velocity Impact Damage and Compressive Strength After Impact for Laminated Composites," *Aerospace Technology*, Vol. 10, No. 1, 2011, pp. 183-192.
6. Ha, J.S., Kim, M.S., Joo, Y.S., and Cho, C.M., "Analysis of Impact Damage and Compression after Impact Strength for Uni-Directional Carbon Fiber Composite Specimens," *Proceeding of the Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Gangwon, Korea, 2014, pp. 312-315.
7. Amaro, A.M., Reis, P.N.B., and Moura, M.F.S.F., "Residual Strength after Low Velocity Impact in Carbon-Epoxy Laminates," *Material Science Forum*, Vol. 514-516, 2006, pp. 624-628.
8. Kim, J.K., MacKay, D.B., and Mai, Y.W., "Drop-weight Impact Damage Tolerance of CFRP with Rubber-modified Epoxy Matrix," *Composites*, Vol. 24, No. 6, 1993, pp. 485-494.
9. Zhang, Z.Y., and Richardson, M.O.W., "Low Velocity Impact Induced Damage Evaluation and Its Effect on the Residual Flexural Properties of Pultruded GRP Composite," *Composite Structures*, Vol. 81, No. 2, 2007, pp. 195-201.
10. Rotem, A., "Residual Flexural Strength of FRP Composite Specimens Subjected to Transverse Impact Loading," *SAMPE Journal*, 1988, pp. 19-25.
11. Chenghong, H., Yubin, L., Zuoguang, Z., and Zhijie, S., "Impact Damage Modes and Residual Flexural Properties of Composite Beam," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 27, No. 11, 2007, pp. 1163-1175.