

적층각도에 따른 단방향 CFRP에서의 중앙 크랙의 파괴 거동에 관한 연구

박재웅* · 전성식** · 조재웅**†

A Study on Fracture Behavior of Center Crack at Unidirectional CFRP due to Stacking Angle

Jae-Woong Park*, Seong-Sik Cheon**, Jae-Ung Cho**†

ABSTRACT: Carbon fiber reinforced plastic (CFRP), one of lightweight materials, is the fiber structure using carbon fiber. It is the composite material that has the characteristics of carbon and plastic. As for the fiber structure, it has the great strength due to fiber direction. CFRP for woven type is used mostly as such a CFRP with lightweight. Woven type is more stable when compared with unidirectional type. On the other hand, woven type is highly priced. Therefore, this study aims to analyze the fiber structure of unidirectional CFRP. In this study, as the stacking angle $[0/X/-X/0]$, X is the variable. This is unidirectional CFRP in which the angle phase of X has been reversed and stacked. By using such a unidirectional CFRP, the analysis model which had a crack at the center as the form of panel with the thickness of 2 mm was used. On analysis, the load is applied on the upper and lower parts being connected with a pin. The damage in the area near center crack was investigated. As for the analysis model, 3D surface model was designed by using CATIA. For CFRP stacking, the stacking direction was determined by using ACP in ANSYS program and the analysis model with two stacks was made. Afterwards, the structural analysis was carried out.

초 록: 경량화 소재 중 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)는 카본 섬유를 이용한 섬유구조물이다. 카본과 플라스틱의 특성을 갖는 복합소재이다. 섬유구조는 섬유방향으로 큰 강도를 갖는다. 이러한 경량 소재인 CFRP로 가장 많이 사용되는 것은 직조된 CFRP이다. 직조된 CFRP는 단방향 CFRP에 비하여 구조가 안정적이기 때문이다. 단 직조된 CFRP는 고가이다. 따라서 본 연구는 단방향 CFRP의 섬유 구조 특성을 파악하고자 하였다. 본 연구에서는 적층각도 $[0/X/-X/0]$ 로 X를 변수로 갖는다. X의 각도 위상이 반전되어 적층된 단방향 CFRP이다. 이러한 단방향 CFRP를 이용하여 중앙 크랙을 갖는 두께 2 mm 판재 형태의 해석 모델을 이용하였다. 해석에서는 핀으로 연결된 상부와 하부에서 하중이 가해지고 있으며 중앙 크랙부분에서 파단을 연구한다. 해석 모델은 CATIA를 이용한 3D Surface 모델로 설계하였다. CFRP 적층을 위해, ANSYS프로그램에서 ACP를 이용한 적층 방향을 결정하여 2개의 적층들을 갖는 해석 모델을 만들었다. 이후 구조해석을 진행하였다.

Key Words: 탄소섬유강화플라스틱(Carbon fiber reinforced plastic), 단방향(Unidirection), 적층 각도(Stacking angle), 파괴 거동(Fracture behavior)

Received 3 November 2016, received in revised form 5 December 2016, accepted 10 December 2016

*Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju University Student

**Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju University

**†Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju University, Corresponding author (E-mail: jucho@kongju.ac.kr)

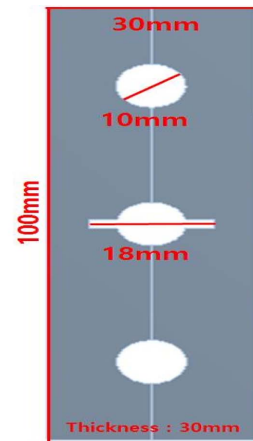
1. 서 론

자동차에서 경량화는 연비 향상과 동시에 출력상승을 구현할 수 있다[1-5]. 현대 기계구조물에서 경량화를 위한 대책으로 경량 소재를 이용한 구조설계가 이루어지고 있다. 차세대 경량화 소재로 섬유 구조물인 CFRP를 말할 수 있다[6-9]. CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)에는 섬유 구조에 따라 단방향 CFRP와 직조된 CFRP가 있다. 직조된 CFRP는 직조공정의 추가로 생산단가가 높다. 따라서 가격적인 측면에서 단방향 CFRP가 유리하다. 하지만 단방향 CFRP는 섬유 구조에 따른 소재의 특성이 다양하게 나타난다. 또한 대부분의 기계 구조물은 볼트 및 리벳으로 체결된다. 볼트나 리벳으로 체결되기 위해서는 소재의 구멍을 뚫어야 하며 구멍 주위로 미세 크랙이 성장하여 소재의 수명을 단축시킨다[10-12]. 실질적으로 소재를 기계 구조물에 적용시키기 위해서는 소재에 적용된 크랙에서 나타나는 파괴 특성을 확인하여야 한다. 실제 기계구조물에서 섬유구조 복합재료의 파괴는 구멍부분의 크랙이 성장하여 재료가 파단되게 된다. 본 연구에서는 적층각도 $[0/X/-X/0]$ 로 X 를 변수로 갖는다. X 의 각도 위상이 반전되어 적층된 단방향 CFRP이다. X 의 각도를 반전시킨 것은 단방향 CFRP를 제작할 시 각도를 반전시키지 않으면 판재의 Normal vector 방향으로 경화과정에서 발생된 힘이 생긴다. 따라서 판재가 휘어질 우려가 있으므로 X 의 각도를 반전시켜 제작한다. 이러한 단방향 CFRP를 이용하여 중앙 크랙을 갖은 두께 2 mm 판재 형태의 해석 모델을 이용하였다. 상부와 하부에 핀으로 연결된 상태에서 하중을 받고 중앙 크랙부분에서 파단이 이루어지는 형태의 해석을 구현하였다. CFRP 적층을 위해 ANSYS 프로그램에서 ACP를 이용한 적층 방향을 결정하여 2개의 Stacking을 갖는 해석 모델을 만들었다. 이후 ANSYS 구조해석을 통한 해석을 진행하였다.

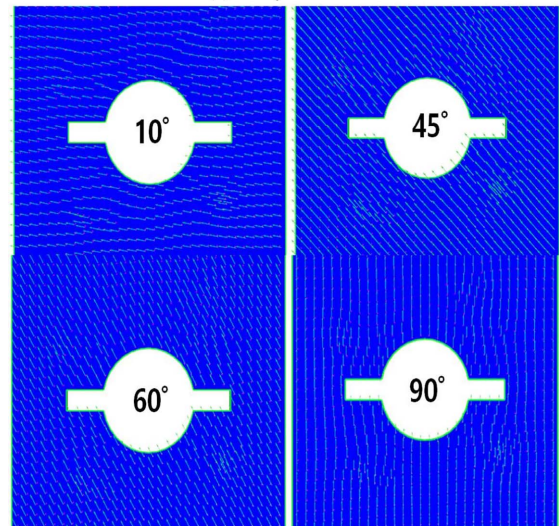
2. 해석 모델 및 조건

2.1 해석 모델

본 연구의 해석 모델은 Fig. 1과 같이 규격은 두께 2 mm 가로 30 mm 세로 100 mm이다. 이러한 단방향 CFRP 판에 직경 10 mm를 갖는 3개의 구멍을 뚫었으며 해석모델의 중앙 구멍에는 구멍 주위로 4 mm씩 추가적인 크랙을 주었다. 해석모델은 3D 모델링 프로그램인 CATIA V5를 이용하였다. 모델링과정까지의 해석 모델은 Surface로 되어 있다. Fig. 1에서 보이는 것과 같이 모델링 이후 Carbon Fiber의 단방향 적층을 위해 유한 요소해석 프로그램인 ANSYS에서 ACP를 이용한 단 방향 섬유의 적층을 진행하여 Solid 형태의 해석 모델을 구성하였다. 중앙 크랙주변을 중심으로 적층각도가 불규칙한 부분이 생기지만 이는 프로그램 계산에 따른 오차이다. 이를 섬유 밀도로 수정하였으나 더



(a) Analysis model



(b) Stacking angle of unidirectional carbon fiber

Fig. 1. Analysis model and stacking angle of carbon fiber

이상 수정할 시 더 큰 오차가 생기기 때문에 최적점까지 수정을 완료한 것이다. 해석 모델은 4개의 판을 갖는 Stacking을 2개 적층한 구조이다. 한개의 Stacking 섬유적층 구조로는 $[0/10/-10/0]$ 에서부터 $[0/90/-90/0]$ 까지 10° 간격으로 진행하였다. 45°의 적층각도를 갖는 단방향 섬유구조는 가장 중앙점이므로 본 연구에서는 추가로 진행하였다. 섬유구조에서 적층각도가 - 값이 들어가는 이유로는 같은 방향의 섬유적층이 2번 연속으로 되어지는 것 보다 더 효율적인 강도를 보이기 때문이다.

2.2 해석 조건

해석 조건으로는 하부 구멍에 Fixed Support를 부여하고 상부 구멍에는 Displacement를 부여하였다. Fig. 2와 같이 Displacement는 +Z축 방향으로 약 5 mm/min으로 움직인다. 해석 조건에서 단방향 CFRP의 물성치로는 Table 1과 같다. 본 연구에서의 해석 요소는 최대 격자 단위 1 mm로 지정하여 약 2714개의 Elements를 갖는다.

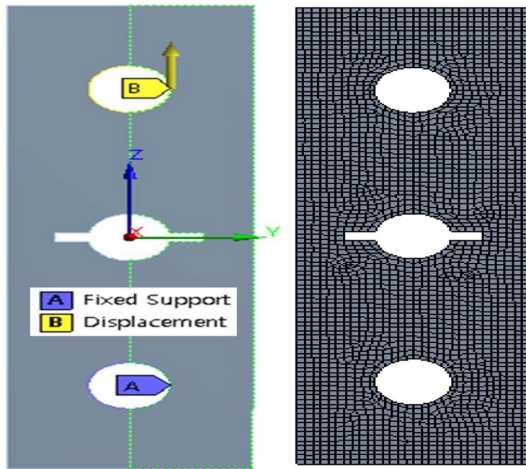


Fig. 2. Analysis condition and model meshes

Table 1. Unidirectional CFRP Properties

	Density (kg/m ³)	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Strength (MPa)
Unidirectional Type CFRP	1.57	1.32x10 ⁵ (X) 8980(Y) 8980(Z)	0.3(XY) 0.74(YZ) 0.3(XZ)	1440(X) 51.72(Y) 51.72(Z)

3. 해석 모델 및 조건

3.1 단방향 CFRP의 적층각도별 최대 등가응력 분포

Fig. 3의 (a)는 적층각도 [0/10/-10/0]인 단방향 CFRP의 Equivalent stress 시뮬레이션 결과이다. 8개의 Ply 중 Equivalent stress가 가장 높게 나타난 판과 가장 낮은 판을 비교하였

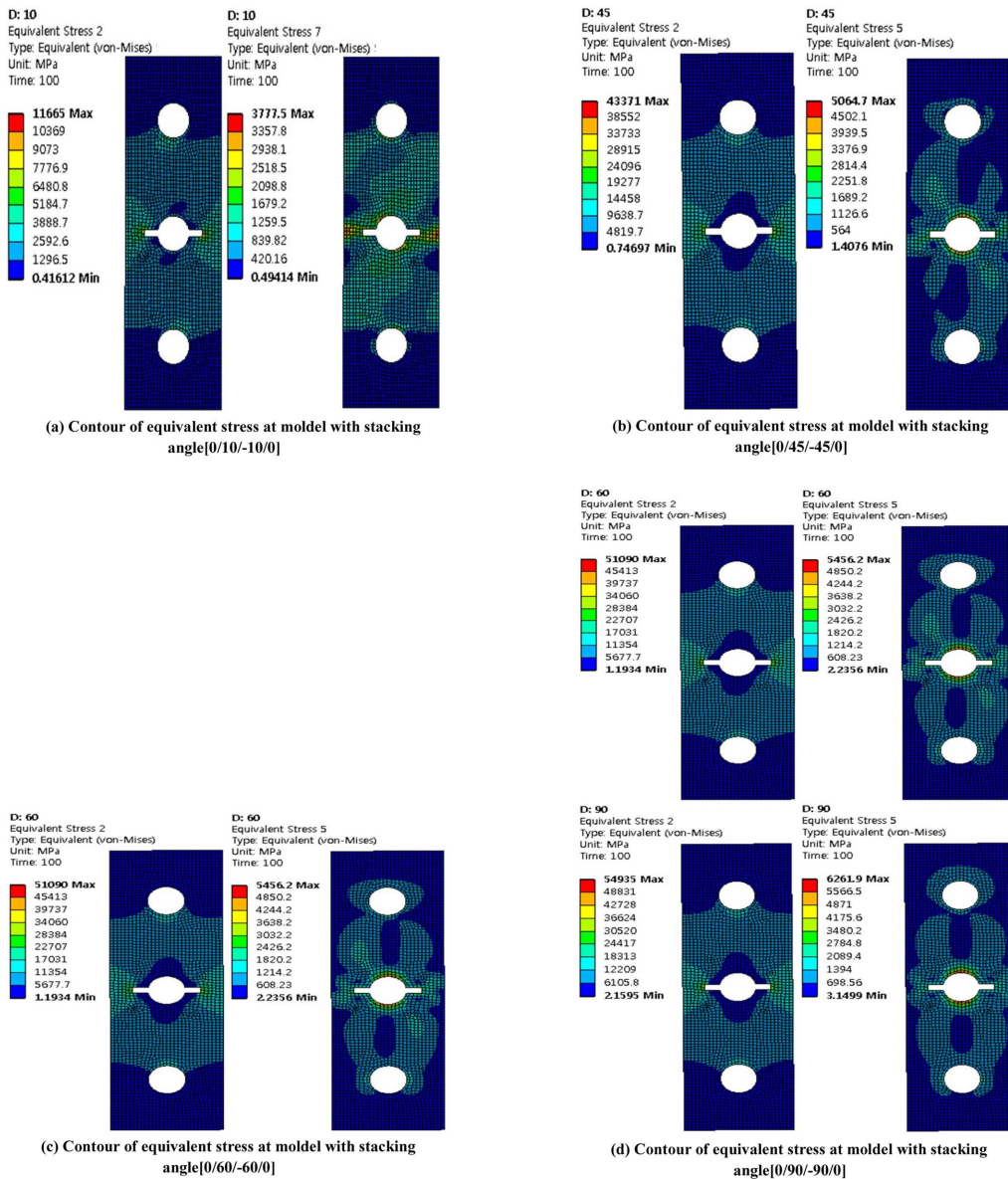


Fig. 3. Contour of equivalent stress due to each stacking angle

다. 2번 판은 적층각도 10°이며 최대 등가응력이 11665 MPa로 가장 높은 값을 갖는 판이다. 7번 판은 적층각도 -10°이며 최대 등가응력 3777.5 MPa로 가장 낮은 값을 갖는 판이다.

Fig. 3의 (b)는 적층각도 [0/45/-45/0]인 단방향 CFRP의 Equivalent stress 시뮬레이션 결과이다. 2번 Ply는 적층각도 45°로 최대 등가응력이 43371 MPa로 가장 높은 값을 갖는 판이다. 5번 판은 적층각도 0°이며 최대 등가응력 5064.7 MPa로 가장 낮은 값을 갖는 Ply이다.

Fig. 3의 (c)는 적층각도 [0/60/-60/0]인 단방향 CFRP의 Equivalent stress 시뮬레이션 결과이다. 2번 판은 적층각도 60°로 최대 등가응력이 51090 MPa로 가장 높은 값을 갖는 판이다. 5번 판은 적층각도 0°이며 최대 등가응력 5456.2 MPa로 가장 낮은 값을 갖는 판이다.

Fig. 3의 (d)는 적층각도 [0/90/-90/0]인 단방향 CFRP의 Equivalent stress 시뮬레이션 결과이다. 2번 판은 적층각도 90°로 최대 등가응력이 54935 MPa로 가장 높은 값을 갖는 판이다. 5번 판은 적층각도 0°이며 최대 등가응력 6261.9 MPa로 가장 낮은 값을 갖는 판이다.

적층각도 [0/10/-10/0]인 CFRP의 경우에는 등가응력 분포가 적층각도 0°인 판과 유사하게 나타난다. 이후 적층각도 [0/60/-60/0]인 해석 모델까지 등가응력이 시험편에 좌우 대칭으로 나타나지 않고 불규칙하게 나타난다. 적층각도 [0/90/-90/0]인 시험편에서 등가응력은 가장 규칙적인 방향으로 나타난다.

3.2 단방향 CFRP의 적층각도별 최대 등가응력 비교

Fig. 4는 적층각도별 최대 등가응력 비교 그래프이다. 그래프의 X축은 적층각도에 따른 해석모델의 분류이다. 적층각도의 변화가 약 45°까지 최대 등가응력이 가파르게 상승한다. 하지만 이후 적층각도 90°에 도달하게 되면 최대 등가응력의 상승이 작게 나타난다. 적층각도 10°, 45°, 60°, 90°의 해석 모델을 대표로 값을 확인하게 되면 각각 11665 MPa, 43371 MPa, 51090 MPa, 54935 MPa이 나타났다.

3.3 단방향 CFRP의 적층각도별 최대 변형에너지 분포

Fig. 5는 적층각도 10°, 45°, 60°, 90°에서의 변형에너지 분

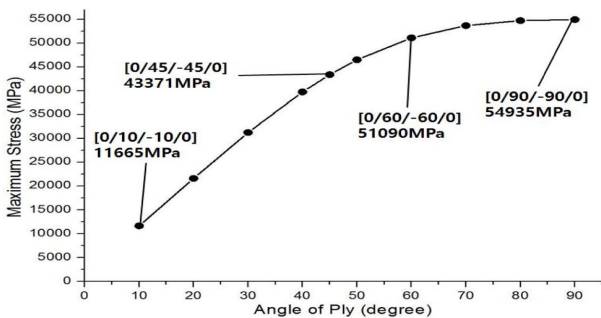


Fig. 4. Graph of maximum equivalent stress due to stacking angle of unidirectional CFRP

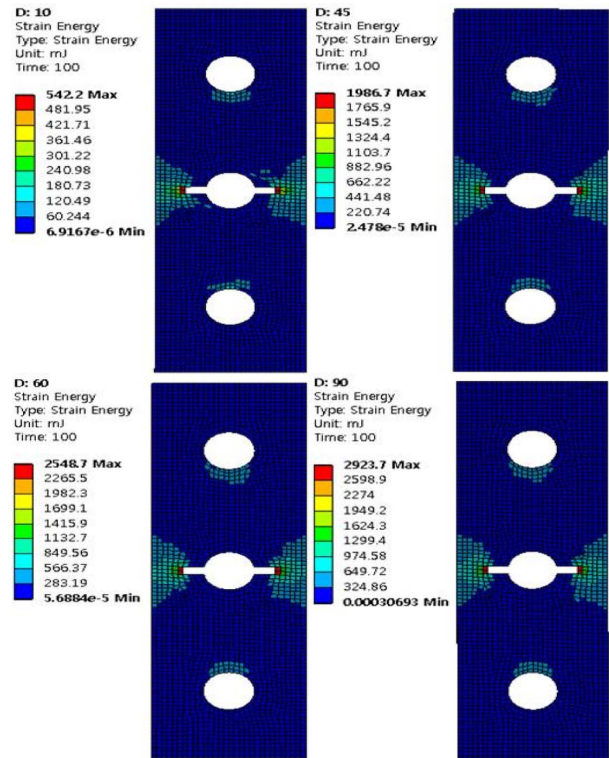


Fig. 5. Contour of maximum deformation energy due to stacking angle of unidirectional CFRP

포를 보여준다. 전체모델 모두 중앙크랙 부분에서 가장 큰 변형에너지가 분포되어 있으며 각 각도 별로 542.2 mJ, 1986.7 mJ, 2548.7 mJ, 2923.7 mJ의 최대 변형 에너지가 나타난다. 적층각도가 커짐에 따라 변형에너지 또한 증가한다.

4. 결론

본 연구에서는 위상이 반대인 방향으로 적층한 단방향 CFRP를 이용하여 중앙 크랙부분에서의 파괴 거동을 해석적으로 확인하였다. 해석은 적층 각도를 10°씩 변화시키며 적층각도 45°인 모델을 이용하여 해석을 진행하였다. 본 연구에서의 결론은 다음과 같다.

- (1) 적층각도 45°인 해석 모델까지 적층각도가 커질수록 비교적 높은 최대등가응력 상승을 보인다. 즉, 적층각도 45°인 구간까지 시험편의 파단이 쉽게 일어날 우려가 있다.
- (2) 최대 변형에너지는 적층각도가 증가 함에 따라 최대 변형 에너지가 커진다. 섬유는 적층각도가 하중과 동일한 방향일 때 가장 큰 변형에너지가 나타난다.
- (3) 최대 변형에너지는 중앙 크랙 주위로 나타나며 모든 적층각도의 CFRP 해석모델이 동일하다. 이는 섬유 방향이 하중에 수직하더라도 하중을 분산시키지는 못한다. 따라서 가장 강도가 강한 하중방향과 섬유방향이 같은 CFRP구조물이 적합하다.

(4) 최대 등가응력과 최대 변형에너지 해석 결과를 보게 되면 적층각도 10°에서 60°까지는 등가응력의 분포가 해석 모델의 전체에 고르게 나타나지 않고 있으며 변형에너지도 낮게 나타난다. 따라서 본 연구와 같은 구조로 설계된 단방향 CFRP를 사용할 때에 적층각도 60~90°의 섬유 구조물이 적당하다.

후 기

본 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2015R1D1A1A01057607).

본 논문은 2016년도 한국연구재단의 국제협력사업 지원을 받아 연구되었음(No. 2016K2A9A2A06004689).

REFERENCES

- Boang, S.O., Kim, K.S., Kim, S.H., Song, S.G., and Cho, J.U., "Study on Compression Test of Aluminum Foam and Honeycomb Sandwich Composites", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 12, No. 9, 2011, pp. 3802-3807.
- Marzi, S., Biel, A., and Stigh, U., "On Experimental Methods to Investigate the Effect of Layer Thickness on the Fracture Behavior of Adhesively Bonded Joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 31, No. 8, 2011, pp. 840-850.
- Jung, J.W., Kim, S.H., Park, J.K., and Lee, W.I., "Research of the Development of the Properties of PLA Composites for Automatic Interior Parts", *Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 3, 2011, pp. 1-5.
- Mohamed, M., Anandan, S., Huo, Z., Birman, V., Volz, J., and Chandrashekhara, K., "Manufacturing and Characterization of Polyurethane Based Sandwich Composite Structures", *Composite Structures*, Vol. 123, 2015, pp. 169-179.
- Paul, A., and Ramamurty, U., "Strain Rate Sensitivity of a Closed-cell Aluminum Foam", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 281, Issues 1-2, 2000, pp. 1-7.
- Hashemi, S., Kinloch, A.J., and Williams, J.G., "The Analysis of Interlaminar Fracture in Uniaxial Fibre-polymer Composites", *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 427, No. 1872, 1990, pp. 173-199.
- Shin, K.B., and Koo, D.H., "A Study on the Evaluation of the Failure for Carbody Structures Made of Laminated Fiber-reinforced Composite Materials Using Total Laminate Approach", *Korean Society for Composite Materials*, Vol. 17, No. 1, 2004, pp. 18-28.
- Blackman, B.R.K., Dear, J.P., Kinloch, A.J., MacGillivray, H., Wang, Y., Williams, J.G., and Yayla, P., "The Failure of Fibre Composites and Adhesively Bonded Fibre Composites under High Rates of Test Part III Mixed-mode I/II and Mode II Loadings", *Journal of Materials Science*, Vol. 31, No. 17, 1996, pp. 4467-4477.
- Giorgi, M.D., Carofalo, A., Dattoma, V., Nobile, R., and Palano, F., "Aluminum Foams Structural Modelling", *Computers & Structures*, Vol. 88, Issues 1-2, 2010, pp. 25-35.
- Blackman, B.R.K., Hadavinia, H., Kinloch, A.J., Paraschi, M., and Williams, J.G., "The Calculation of Adhesive Fracture Energies in Mode I: Revisiting the Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) Test", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, No. 2, 2003, pp. 233-248.
- Lee, J.H., Cho, J.U., and Cheon, S.S., "An Investigation on the Behavior of Fracture Mechanics as the Type of Mode I at Specimen Bonded with Tapered Carbon Fiber Reinforced Plastic", *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 29, No. 2, 2016, pp. 85-89.
- Lee, J.H., Cho, J.U., Cheon, S.S., and Kook, J.H., "Fracture Behaviour Analysis of the Crack at the Specimen with the Type of Mode I Composed of the Bonded Carbon Fiber Reinforced Plastic", *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 28, No. 6, 2015, pp. 356-360.