

접합된 CFRP로 구성된 Mode I형 시험편 크랙의 파괴 거동 해석

이정호* · 조재웅**† · 전성식*** · 국정한****

Fracture Behaviour Analysis of the Crack at the Specimen with the Type of Mode I Composed of the Bonded Carbon Fiber Reinforced Plastic

Jung-Ho Lee*, Jae-Ung Cho**†, Seong-Sik Cheon***, Jeong Han Kook****

ABSTRACT: In this paper, the carbon fiber reinforced plastic is processed as the double cantilever beam in order to estimate the fracture behavior of composite and is carried out with the static analysis as the mode I. The specimen sizes are 25 mm, 30 mm, 35 mm and 40 mm. And the material property is used with carbon. As the analysis result of mode I, the adhesive part is detached latest by the small force at the specimen thickness of 25 mm. The largest force is happened at the specimen thickness of 40 mm. The deflection of the adhesive interface is shown slowest at the displacement of 9.75 mm at the specimen thickness of 25 mm. And the deflection is shown quickest at the displacement of 7.82 mm at the specimen thickness of 40 mm. This deflection is due to the fracture of specimen. The result of this study on the deflection of the adhesive interface and the reaction force due to this deflection is thought to be contributed to the safe structural design of the carbon fiber reinforced plastic.

초 록: 본 논문에서는 복합재료 접합부의 파손거동 예측을 위해 CFRP를 DCB 형태로 가공하여 Mode I 정적해석을 수행하였다. 시험편은 각각 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm의 4가지 경우로, 방향성을 지니지 않은 탄소섬유의 물성치를 이용하였다. Model I 해석을 통해 나온 결론으로는 25 mm에서 낮은 힘으로 가장 늦게 접착부에서 떨어지는 것을 볼 수 있었으며 40 mm에서 가장 높은 힘이 발생하였다. 접합부의 접착계면 탈락은 25 mm의 시험편 두께에서 9.75 mm로 가장 느리게 나타났으며 40 mm의 시험편 두께에서 7.82 mm로 가장 빠르게 나타난 것을 볼 수 있었다. 이 탈락은 시험편의 파괴에 의한 것이다. 접착계면의 탈락과 이에 따른 반력에 관한 본 연구 결과는 CFRP의 안전한 구조설계에 이바지할 수 있을 것으로 사료된다.

Key Words: 탄소섬유보강플라스틱(Carbon fiber reinforced plastic), 이중외팔보(Double cantilever beam), 파괴 거동(Fracture behaviour), 접착계면(Adhesive interface), 탈락(Defection)

1. 서 론

현대산업의 특성은 고 효율성을 중시하며 고 강도와 경량성을 동시에 요구하고 있다. 이에 따라 과거 단일 금속재료의 위치를 점차 복합재료의 사용이 증가하고 있는 추세

이다. [1-3] 이런 소재 중 탄소섬유 프리 프레그를 적층한 CFRP는 가장 조명 받고 있는받고 있는 소재로, 고강도와 경량성을 특징으로 항공과 레저, 방산에 걸쳐 모든 산업에 광범위하게 사용되고 있다. 하지만 성형성이 떨어져 부분으로 조립되어 사용되고 있지만 기존의 볼트와 너트, 리벳

Received 7 September 2015, received in revised form 2 November 2015, accepted 18 December 2015

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju University

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

***Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju University

****School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

을 이용한 기계식 접합방식을 사용하게 되면 체결압력에 의한 크랙발생으로 인한 내구성 저하의 원인이 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 접착체를 이용한 화학적 접합방식이 폭넓게 사용되고 있다[4-8]. 더불어, 오랜 기간동안 사용되어온 금속재료와 달리 사용 역사가 짧은 CFRP는 주로 기계적 특성향상에 대한 연구만 진행되어 왔을 뿐이라, 접합 및 파손에 관한 연구가 상대적으로 부족한 실정이다. 파괴에 있어, CFRP의 파손 메커니즘은 상당히 복잡하고 다양하여 연구에 관한 접근이 쉽지 않았다[9,10]. 이러한 연구 실정에 의해 비강도, 비강성이 우수하여 널리 사용되고 있는 CFRP접합구조물의 경우 그 유용성에도 불구하고 피로 파괴에 대한 예측이 어려운 난제로 인해 데이터가 부족한 것이 현재의 실정이다. 본 연구에서는 접착제로 접합된 CFRP의 Mode 1 정적해석에 관한 것으로 영국공업규격에 의거한 DCB 시험편을 피로하중 실험기에 거치한 상태를 가정하여 두 개의 구멍중 하나를 고정된 후, 다른 한쪽을 -Z방향으로 잡아당길 때 발생하는 크랙의 역학적 거동에 관하여 CATIA V5를 이용한 모델링을 ANSYS를 통해 해석을 수행하였다. Mode 1 환경에서 발생하는 접합된 CFRP DCB 시험편에서의 크랙의 역학적 거동에 대한 데이터를 해석을 통한 기계적 특성들을 체계적으로 분석할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 해석모델 및 구속 조건

본 논문에 사용된 연구모델은 Fig. 1에 도시하였다. 연구모델은 가로 50 mm, 세로 200 mm로 영국 공업규격에 의거하여 넥킹(Necking) 현상을 방지하기 위해 변형된 모델이다. 상부 시편의 구멍에는 강제변위를 주었으며 이때의 속도는 40 mm/min으로 고정된 하부 시편에서 연직방향으로 이동한다. 이때 연구모델의 변수는 두께로 지정하여 각각 25, 30, 35, 40 mm의 4가지 경우로 해석을 진행하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 해석에 적용된 접착계면에 관한 내용으로 Fig. 2는 해석모델의 요소생성을 나타내었다. 상하부의 동일한 요소는 각 절점을 연결하여 접착계면 형성을 도식화 하였다. Fig. 3은 접착계면에 관한 TB이론을 나타낸 것으로 접착계면의 접착력은 일정 수치까지 선형으로 증가하며 이 수치 이후로 접착력을 잃고 절점간의 연결을 해제한다. 이

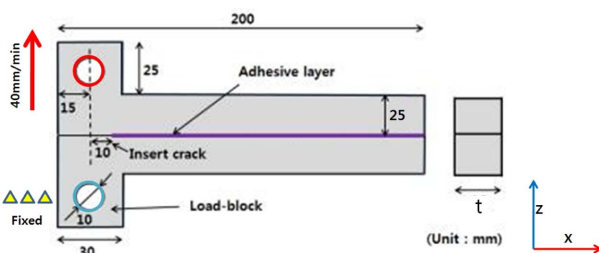


Fig. 1. Analysis model and constraint condition

를 통해 접착체의 점성을 표현할 수는 없지만 접착계면이 시편에 미치는 영향을 해석적으로 표현할 수 있다.

해석에 사용된 물성치는 Table 1에 나타내었다. 물성치는 실험을 위해 제작한 CFRP 제조사의 시험결과를 토대로 기

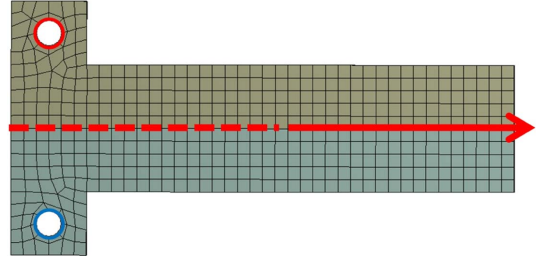


Fig. 2. Connection of nodes between each element of analysis model

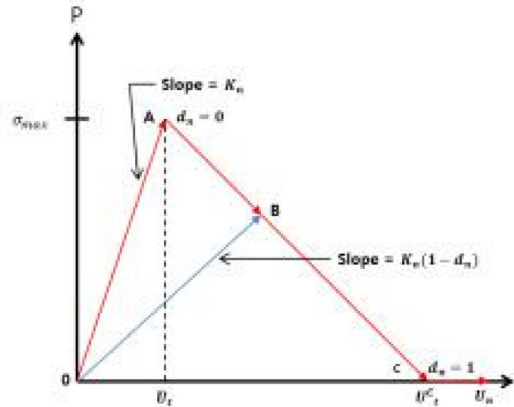


Fig. 3. TB theory applied to the adhesive interface of analysis model

Table 1. Properties of materials

Woven carbon	
Density (kg/m ³)	1.52
Young's Modulus (GPa)	132
Poisson's Ratio	0.03
Bulk Modulus (GPa)	24
Yield Strength (MPa)	950
Unidirectional carbon	
Density (kg/m ³)	1.57
Young's Modulus XY (MPa)	1.32×10 ⁵
Young's Modulus XZ (MPa)	8980
Young's Modulus YZ (MPa)	8980
Poisson's Ratio XY	0.3
Poisson's Ratio XZ	0.74
Poisson's Ratio YZ	0.3
Shear Modulus (MPa)	50769

입하였으며, 해석모델은 가장 외부를 이루는 Woven carbon과 심재인 Undirectional carbon으로 구성되었다. 이때 해석의 변수인 두께 t 는 심재의 두께를 의미한다. 실제로는 수지를 이용하여 서로 합침되어 있으나 본 논문에서는 각기 모델링하여 하나의 모델로 나타내었다.

3. 해석결과

Fig. 4는 강제변위에 따른 시편의 접착계면의 탈락까지의 지지반력에 관한 것으로 두께가 증가할 수록, 반력의 값이 커짐을 볼 수 있다. 이런 지지반력은 두께 25 mm에서 탈락변위 8 mm에서 673 N으로 가장 작으며 뒤이어 두께 30 mm에서 866 N, 두께 35 mm에서 890 N, 40 mm에서 940 N으로 나타났다. 이 같은 결과를 통해 두께가 증가함에 따라 접착계면의 접촉면적의 증가로 CFRP의 크랙에 의해 발생된 파단으로 인한 계면의 탈락변위가 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 다음의 Fig. 5는 두께 25 mm에서의 변위에 따른 등가응력 분포에 관한 것이다.

두께 25 mm의 등가응력 분포는 시험기에 걸리는 것을 가정한 강제변위 부위와 고정부위에서 가장 크게 발생하고

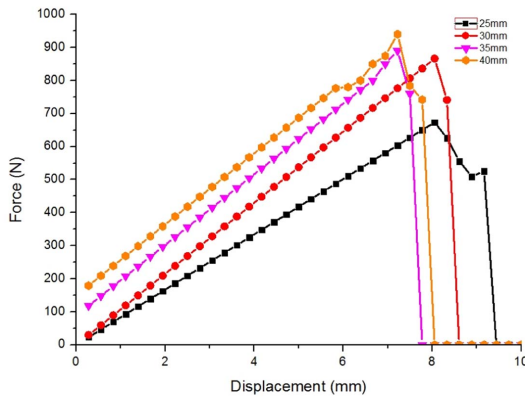


Fig. 4. Defection of each DCB specimen due to displacement

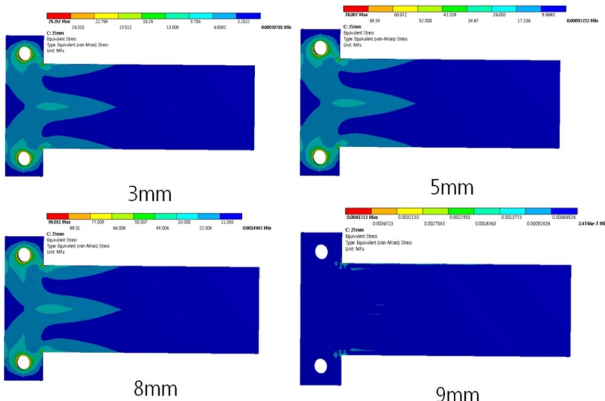


Fig. 5. Equivalent stress due to displacement at the specimen thickness of 25 mm

있음을 볼 수 있는데, 초기 변위가 시작되는 3 mm에서 30 MPa로 시작하여 5 mm에서 78 MPa, 최고 변위를 찍는 8 mm에서 약 100 MPa이 발생한다. 발생한 등가응력은 접착계면을 향해 상부와 하부의 시편에서 발생하여 이동하고 있다. 이러한 응력의 이동은 9 mm에 이르러서 해방되고 있음을 볼 수 있다. 이때 Fig. 6에서 볼 수 있듯, 접착계면에서 발생하는 응력은 약 14 MPa이 발생됨을 볼 수 있다.

Fig. 7에서와 같이 최초 변위가 시작되는 지점에서 발생하는 최대 등가응력은 35.2 MPa로 나타났으며 접착계면의

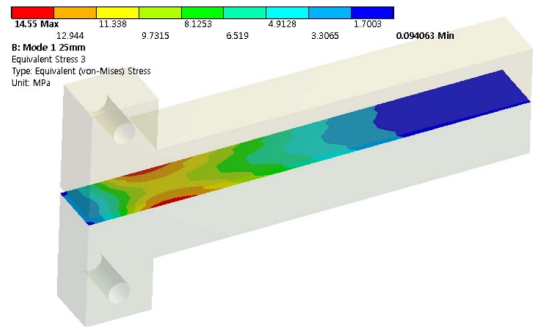


Fig. 6. Equivalent stress of adhesive interface at the specimen thickness of 25 mm

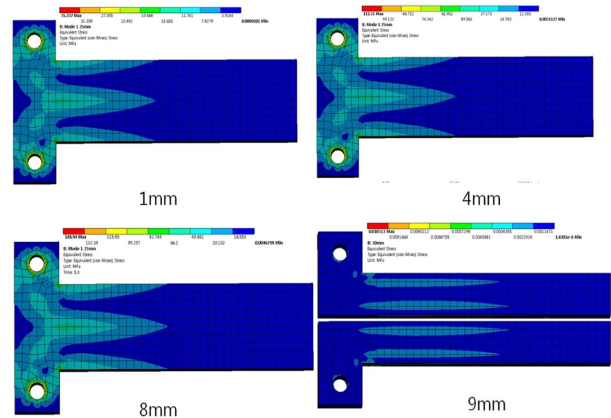


Fig. 7. Equivalent stress due to displacement at the specimen thickness of 30 mm

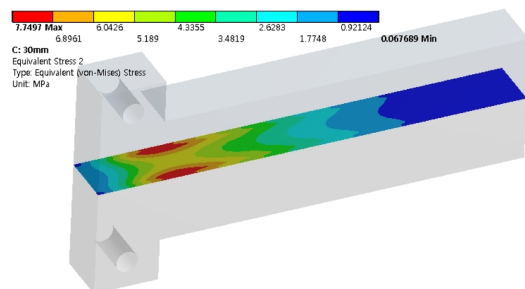


Fig. 8. Equivalent stress of adhesive interface at the specimen thickness of 30 mm

탈락 직전의 변위 8 mm에서 약 148 MPa로 나타났다. 이때 접착계면의 분리가 발생하는 변위에서 발생하는 최대 응력은 Fig. 8에서와 같이 약 7.7 MPa로 나타남을 볼 수 있다. Fig. 9는 변위 35 mm에 관한 것으로 최초 변위가 시작되는 지점에서 최고 등가응력은 약 8 MPa로 나왔다. 이어서 변위

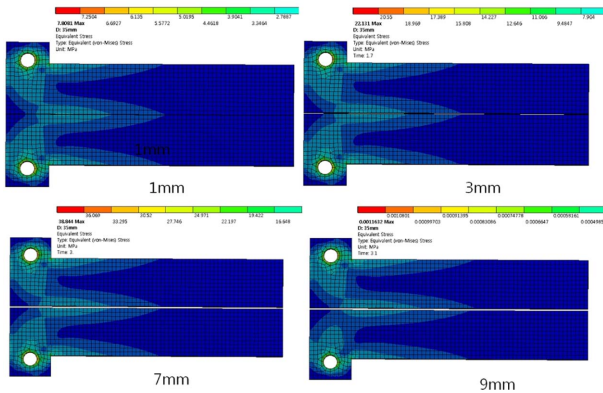


Fig. 9. Equivalent stress due to displacement at the specimen thickness of 35 mm

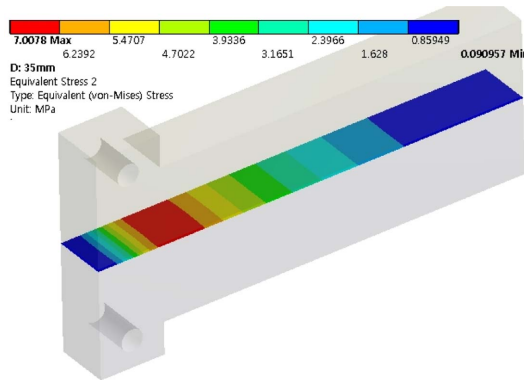


Fig. 10. Equivalent stress of adhesive interface at the specimen thickness of 35 mm

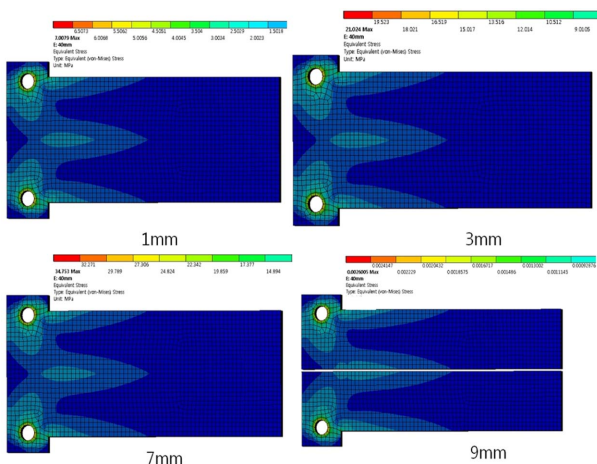


Fig. 11. Equivalent stress due to displacement at the specimen thickness of 40 mm

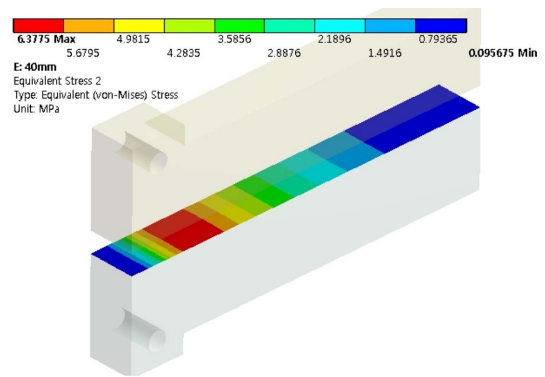


Fig. 12. Equivalent stress of adhesive interface at the specimen thickness of 40 mm

가 계속되어 접착계면에서 분리되는 시점에서는 약 35 MPa의 결과가 나오는데, Fig. 7의 결과와 비교해 보았을 때, 변위와 고정을 위한 구멍주변을 제외하고는 전체적으로 균등한 값이 발생되고 있음을 볼 수 있다. 이를 토대로 35 mm부터 강제변위에 대한 시편의 저항력이 안정권에 들었음을 볼 수 있다. 이때 발생하는 접착계면의 응력도 Fig. 10에서와 같이 30 mm에서보다 낮은 값을 보이고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 11은 두께 40 mm에서의 결과로, 대부분의 결과는 두께 35 mm와 비슷한 양상을 보이고 있다. 두께 35 mm와 다른 점으로는 응력 분포의 양상은 비슷하지만 분포는 더 넓은 형상을 보이고 있다. 또한 접착계면의 응력에 있어서도 Fig. 12에서와 같이 35 mm보다 감소된 6.3775 MPa를 보이고 있다. 이 결과를 토대로 Mode 1 DCB시험편의 변위의 따른 등가응력과 반력을 보았을 때, 접합부의 접착계면의 분리에 이르기까지의 등가응력은 두께가 제일 얇았던 25 mm에서 가장 높았으며, 가장 두꺼웠던 40 mm에서 가장 낮았다. 이 같은 등가응력의 분포는 시험편의 두께가 증가함에 따라 응력의 균등한 분포가 이루어지고 있음을 볼 수 있었다. 이에 대한 반증으로, 변위에 따른 반력의 분포에서 25 mm에서 가장 늦게 떨어지지만 반력은 낮은 결과를 보여, 접합계면의 접착력이 변위보다 우세하였지만, 40 mm에서는 접합계면에 저항하는 힘이 더 높으며 이에 따라 높은 응력에서도 견딜 수 있음을 해석을 통해 사전에 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 접합된 CFRP Mode 1 크랙의 역학적 거동에 관하여 시뮬레이션 해석을 통해 결과를 도출하였다.

1. 각 변위에 따른 반력은 두께 25 mm에서 가장 낮으며, 두께 40 mm에서 가장 높은 값을 보이고 있다. 또한 접합계면에서 분리되기까지의 반력은 40 mm에서 940 N, 25 mm에서 640 N이 발생됨을 볼 수 있었다. 따라서 두께가 증가함에 따라 강제변위에 대한 저항이 높아지고 있음을 볼 수 있었다.

2. 각 변위에 따른 등가응력 분포는 두께 25 mm에서 가장 높았고, 40 mm에서 가장 낮은 값을 보이고 있으나 응력의 분포에 있어 다른 두께의 시험편들과 달리 40 mm에서는 넓게 분포하면서도 시험편의 목 주변 응력이 가장 낮은 결과를 보였다. 이를 통해 시편에 가해지는 응력의 감소로, 강제변위에 대한 시편의 크랙발생이 감소되고 있음을 볼 수 있었다.

3. 접착계면의 응력에 있어 초기 25 mm에서 14 MPa가 발생한 것에 반해 40 mm에서 6.3 MPa까지 감소됨을 볼 수 있었다. 이를 통해 두께가 증가할수록, 접착계면에서 발생하는 응력의 감소로 접착계면의 파괴가 발생이 적게 발생됨을 알 수 있었다.

4. 본 논문의 각 두께별 Mode 1 시험편의 해석결과를 토대로 CFRP가 적용되는 구조물의 안전설계와 안전성 평가에 이바지할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0006548).

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

REFERENCES

1. 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, pp. 3802-3807, 2011.
2. 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, pp. 233-248, 2003.
3. De. Giorgi, M., Carofalo, A., Dattoma, V., Nobile, R., and Palano, F., "Aluminum Foams Structural Modelling", *Computers & Structures*, Vol. 88, Issues 1-2, pp. 25-35, 2010.
4. 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, pp. 18-28, 2004.
5. 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, pp. 4467-4477, 1996.
6. Hashemi, S., Kinloch, A.J., and Williams, J.G., "The Analysis of Interlaminar Fracture in Uniaxial Fibre-polymer Composites", *Proc. R. Soc. Lond.* Vol. 427, No. 1872, pp. 173-199, 1990.
7. Paul, A. and Ramamurty, U., "Strain Rate Sensitivity of a Closed-cell Aluminum Foam", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 281, Issues 1-2, pp. 1-7, April, 2000.
8. 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, pp. 169-179, 2015.
9. 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, pp. 840-850, 2011.
10. 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, pp. 1-5, 2011.