

인발 성형법을 이용한 C/GFRP 복합소재 신호등 부착대의 구조적 안정성에 관한 연구

나경수^{*,**}, 박이구^{**,***,#}

^{*}(주)유니온시티, ^{**}전주대학교 탄소융합공학과, ^{***}전주대학교 기계자동차공학과

Structural Stability Study of C/GFRP Composite material Traffic Light Fixture and Wind Load

Kyoung-Su Na^{*,**}, Lee-Ku Kwac^{**,***,#}

^{*}Technology Development Team, UNION CITY Co., Ltd.

^{**}Department of Carbon Convergence Engineering, Jeonju University

^{***}Department of Automotive and Mechanical Engineering, Jeonju University

(Received 14 September 2021; received in revised form 21 September 2021; accepted 12 October 2021)

ABSTRACT

As the climate changes rapidly due to warming, it is becoming very important to ensure the stability of environmental structures. It is necessary to choose a material that withstands repeated external forces (wind loads) and satisfies members and joints that have energy absorbing power. Even if the strength of the traffic light attachment is sufficient, if the rigidity is insufficient, there is a limit to the displacement during strong winds. Excessive deformation may cause damage and fall, resulting in a safety accident. The author intends to study mechanical properties and resistance to external environment as a structural material capable of withstanding wind load (50m/sec) by fabricating a C/GFRP composite traffic light attachment using the pultrusion method (Pultrusion).

Keywords : Pultrusion(인발성형), Composite Material(복합소재), Cross Bar(가로재), Traffic Light(신호등주), Structural Analysis(구조해석)

1. 서 론

종래의 신호등 지주장치는 와이어 조가선을 이용하여 수직방향으로 작용하는 하중에 대해서만 구조적으로 보강해 주지만 수평에 대한 하중이 취약하며 주로 금속재료가 사용되고 있어 고중량으로서 시공에 많은

어려움이 있으며, 용접연결 이음으로 부식되기 쉽기 때문에 매년 강풍으로 인한 파손과 안전사고가 증가하고 있다.

이에 극한환경에서 요구되는 엄격한 규제조건을 충족시킬 수 있는 차세대 소재에 대한 필요성이 증대되고 있다^[1]. 따라서 더욱 강화된 기준에 맞는 안전 시설물 설계가 요구되고 있으며 각종 공기역학적 현상을 규명하기 위해 연구가 진행되고 있다^[2-4].

복합 재료는구성 요소가 대체적으로 원활하게 설계

Corresponding Author : kwac29@jj.ac.kr

Tel: +82-63-220-3063, Fax: +82-63-220-3161

되며 원하는 품질을 제공하고 거의 모든 경우에 있어 단일재료만 사용하는 것보다 유리하며 구성 요소 성능을 최적화하는 데 필요한 특성을 가질 수 있다⁵⁾.

복합소재의 성형법은 강화재 및 기지재 선택에 따라 매우 다양한 제조 공정이 있지만 본 연구에서는 열경화성 고분자 복합소재와 인발공법(Pultrusion)⁶⁾을 이용하여 C/GFRP 복합소재 신호등 부착대를 복합소재 적용하기 위하여 기계적 성질 및 풍하중에 대한 내력을 연구하였으며 이때의 섬유와 라미네이트 및 매트릭스는 선행탄성이며 거시적으로 등방성으로 가정하여 균일화된 강성 매트릭스로서 접근하였다.

2. 해석조건 및 실험방법

2.1 C/GFRP 부착대 신호등주 구조해석 조건

교통신호등의 지주 및 가로재는 복합소재의 패턴, 두께, 보강재 등을 고려하였으며 풍하중을 적용하여 응력 및 변형 해석을 수행하였고 풍하중이 적용될 경우에 교통신호등에 미치는 결과를 분석하여 설계 개선에 대한 기본 작업을 수행하였다⁷⁾.

지주와 가로재의 단면에 압력을 주고 신호등은 가로재와 연결 지점에 풍속압과 축방향 단면을 곱한 하중값을 입력하였으며 교통신호등 하단의 경계조건은 Ficed 고정 조건 적용하여 6자유도를 모두 구속하였다. 교통신호등 지주에 미치는 풍하중의 영향은 공기의 밀도 및 속도, 구조물의 형상 및 강도, 그리고 평면의 조도 등에 좌우된다⁸⁾.

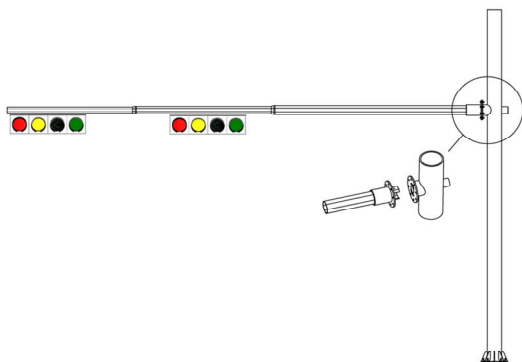


Fig. 1 Traffic Light pole design

해석에 적용된 풍압의 경우 풍속을 최대 50m/s로 가정하였으며 항력계수(C_d)의 경우 신호등, 부착대, 표지판의 경우 1.2, 지주의 경우 0.7로 가정하였으며 이를 통해 지주의 경우 $109.3kgf/m^2$, 가로재와 신호등은 $187.5kgf/m^2$ 의 값을 적용하였다.

또한, 재료의 물성의 경우 지주에는 일반 구조용 탄소강관(SGT275)을 사용하였으며 가로재의 경우 탄소섬유(TAIRYFIL TC35 24K), 유리섬유(OCV Reinforcements U527)(Roving 312 JUSHI), 에폭시는 수지-비닐계(Polysta RP-826BS)를 적용하였으며 아래의 Table 1에 이에 대한 기계적 물성을 나타냈다.

부착대의 수평면적을 줄이기 위하여 내부의 보를 수직으로 보강한 설계안을 Type A, 수평으로 보강한 설계안을 Type B, 외형 두께를 보강한 설계안을 Type C로 구분하였으며 이를 통해 C/GFRP 부착대 신호등주의 응력분포를 파악하기 위하여 범용 유한요소해석프로그램을 사용하였으며 Tetra Element와 Quad Element 격자를 생성하여 해석을 진행하였으며 각각의 설계안에 대하여 Table 2에 구분하였다.

Table 1 Mechanical properties

Materials	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)
SGT275	-	400
TC35	840	4,000
U527	81	3,751
JUSHI 312	79.164	2,513

Table 2 Analysis conditions by design type

Type	A	B	C
Size (mm)	150*150*6	150*150*6	180*180*10
Design			
Number of Elements (EA)	699 806	699 806	760 722
Number of Nodes (EA)	358 868	358 868	402 487

2.2 C/GFRP 복합재의 물성

제작된 C/GFRP 가로재의 인발성형 특성을 알고자 복합재의 적층 구조 및 수지함량을 분석을 진행하였으며 열처리를 통해 수지 제거 후 섬유 무게를 측정하고, 적층 구조를 분석하였다.

시편은 인발 성형한 가로재를 205 X 25 크기로 절단하였으며, 열처리 전 무게는 119.9g이다. 열처리는 Fig.2와 같이 고온용 진공 열처리로를 사용하였으며, 450°C에서 5시간동안 유지하였고 급격한 산화를 방지하기 위하여 질소 분위기에서 분당 5°C씩 승온 하였다.

또한, 복합재 구성재의 함유율을 평가하기 위해 ASTM D3171에 의거하여 고온 연소법 시험을 진행하였다. 아래의 식(1)과 식(2)는 각각 섬유 무게 함유율(W_r)과 수지 무게함유율(W_t)이며 식(3)과 식(4)는 섬유 부피함유율(V_r)과 수지 부피함유율(V_m), 식(5)는 기공함유율(V_v)에 해당한다. 이때 ρ_r 는 강화재의 밀도, ρ_c 는 복합재료의 밀도, ρ_m 은 수지의 밀도이다^[9].

$$W_r = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (1)$$

$$W_t = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (2)$$

$$V_r = \frac{M_i}{M_i} \times 100 \times \frac{\rho_c}{\rho_r} \quad (3)$$

$$V_r = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \times \frac{\rho_c}{\rho_m} \quad (4)$$

$$V_v = 100 - (V_r + V_m) \quad (5)$$



Fig. 2 Crossbar specimen heat treatment

2.3 C/GFRP 복합재의 강도/환경 테스트

신호등 가로재는 자체중량에 의한 수직방향으로 지속 작용하는 고정하중과 바람과 같은 외압에 의해 작용하는 풍하중으로부터 견딜 수 있도록 충분한 내력을 갖춰야 한다.

따라서 신호등 가로재의 인장강도는 ASTM D 3039 규격, 굴곡강도는 ASTM D 790 규격에 의거하여 측정하였다. 시험편은 각각 10t이며 시험회수는 5회 측정하였고 이는 Fig. 3에 나타났다.

또한, 가로재의 사용 환경에 따른 내구성 평가를 위하여 환경챔버를 이용하여 저온, 고온에서 인장 시험을 실시하였다. 시험 장비는 MTS社의 370.10 모델을 사용하였으며 -30°C, 80°C 조건에서 상온에서와 마찬가지로 각각 5개씩 측정하였다.

구조물의 안정성은 복합재료 자체 강도도 중요하지만 복합재료의 체결부에 의해 결정되기 때문에 체결강도는 중요한 요소 중 하나이다^[10].

따라서 복합재료 가로재의 체결강도 시험을 진행하였으며 ASTM D 2734 규격에 의거하였다. 시험 샘플은 135mm X 36mm X 10t이며 볼트로 체결할 수 있는 6 mm 지름의 홀이 있는 시편으로 준비하였다.

복합재료를 접합할 시 응력집중 발생을 줄이고자 기계적 체결과 가로재와 리브 사이를 예폭시로 주입하는 접착 체결을 혼용하였으며 MIDI社의 UT-100E 재료만능시험기로 시험을 진행하였고 이는 Fig. 4에 나타났다.

또한, 풍동테스트를 진행하기 위하여 신호등 수평면적은 350mm*1400mm, 보호금구를 포함한 무게는 16kg으로 2Set를 장착하였다. 스틸 부착대와 복합소재 부착대를 풍하중(50m/sec)을 가하고 스트레인 게이지를 이용하여 응력과 변형률을 측정하였다^[11-14]].

Strain-1은 가로재의 자유단으로부터 동일 위치의 굽힘변형률, Strain-2는 가로재의 최대 변형률 발생 예상 위치의 굽힘변형률, Strain-3은 세로지주의 굽힘변형률, Strain-4은 세로지주의 전단변형률을 측정하기 위해 스트레인게이지를 부착하여 측정하였으며 이는 Fig. 5에 나타났다.



Fig. 3 Tensile and bending test



Fig. 4 Bearing strength test



Fig. 5 Real wind tunnel test[(a)Attached Composite Material, (b)(c)(d) Attached Strain Gauge]

3. 결과 및 고찰

3.1 C/GFRP 부착대 신호등주 구조해석 결과

구조해석을 통해 부착대의 수평면적을 줄이기 위한 보강 타입별 최대 응력발생 결과를 도출하였다. 최대응력이 지주의 경우 베이스 리브 연결부에서 127 MPa로 나타나 소재(SGT275)의 항복 강도

275 MPa 보다 낮았으며 부착대의 경우 부착대 리브 연결부에서 108 MPa로 소재의 인장강도 410 MPa 보다 낮게 나타났다.

따라서, C/GFRP 부착대 자중 및 50m/s의 측면 풍하중에 대하여 구조적으로 안전한 것을 확인할 수 있었으며 보강대 타입에 따라 Type C의 경우가 가장 응력 발생이 적어 외형 두께 보정이 응력 발생 저하에 가장 효과적인 것으로 판단하였다. 해당 결과는 Table 3와 Fig. 6에 나타났다.

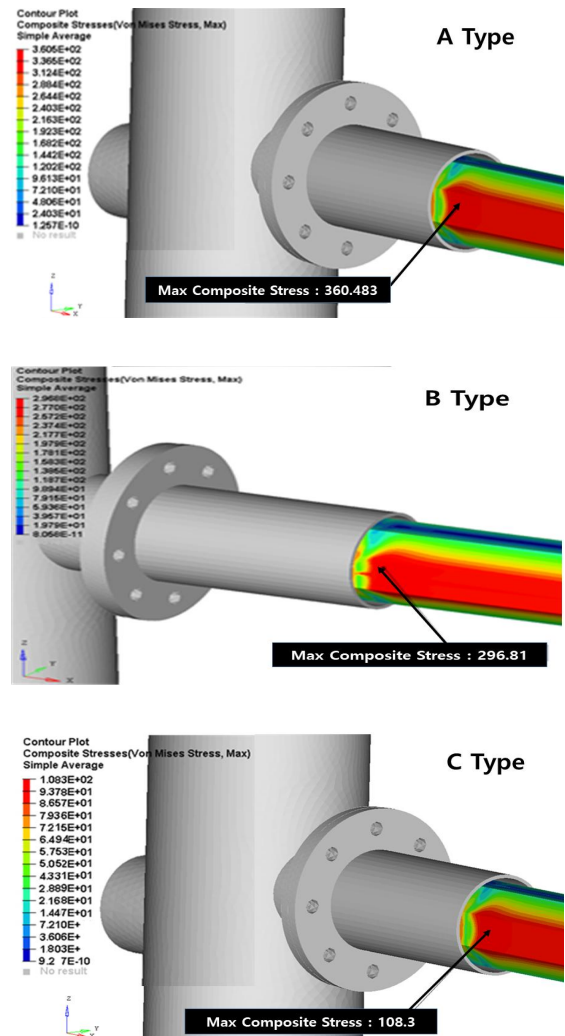


Fig. 6 Results of finite element analysis according to type of reinforcement

Table 4 Results of data according to type of reinforcement

	Type A	Type B	Type C
Displacement [Fixed load] (mm)	140.8	161.3	99.1
Displacement [Wind load] (mm)	573.1	506	400
Max Equivalent Stress(MPa)	360.48	296.8	108

3.2 C/GFRP 복합재의 물성 결과 분석

복합재를 제조하기 위한 인발성형용 수지의 경우 세원화성社의 비닐에스테르 SR825를 사용하였으며 촉진제의 경우 동일社의 P-VN, 경화제는 Methyl Ethyl Ketone Peroxide를 사용하였으며 열처리 결과 비닐에스테르 수지가 탄화되어 재 형태로 변하는 것을 확인하였다.

열처리 후 무게 측정 결과 119.9g에서 87.1g으로 감소하였으며 제품의 수지함량이 27.4wt%임을 확인할 수 있었으며 가로재 제작 시 섬유와 수지 비율은 7:3으로, 인발 특성상 손실되는 수지를 고려하였을 시 안정적인 비율로 성형되었음을 Fig. 7, Fig.8과 같이 확인할 수 있었다.

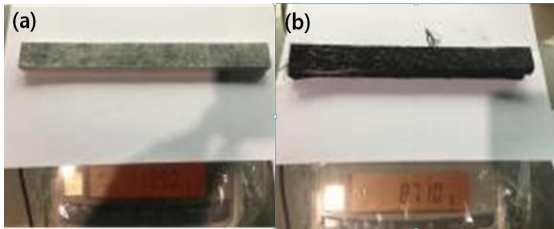


Fig. 7 Heat treatment test specimen [(a)before (b)after]

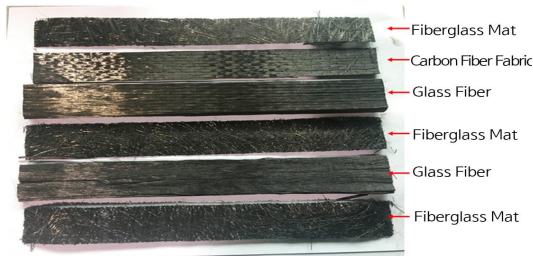


Fig. 8 Lamination state of the specimen after heat treatment

또한, 기공함유율 결과의 경우 약 3.29%로 측정되었고, 수지가 지배적인 역할을 하는 층간전단특성과 층간파괴 특성은 낮아질 것으로 판단된다.

3.3 C/GFRP 복합재의 강도 및 환경 테스트 결과 분석

신호등 가로재의 C/GFRP 복합재 인장강도와 굴곡강도의 경우 인장강도는 411MPa, 인장탄성률은 40.9GPa, ASTM D3039 굴곡강도 578MPa, 굴곡탄성률은 35.3GPa 측정되었으며 이는 Fig. 9, Fig. 10에 나타났다. 또한 저온과 고온 측정 결과의 경우 저온 인장강도 감소율은 6.5% 고온 인장강도는 7.8% 감소율 보였으며 이는 Table 5에 나타났다.

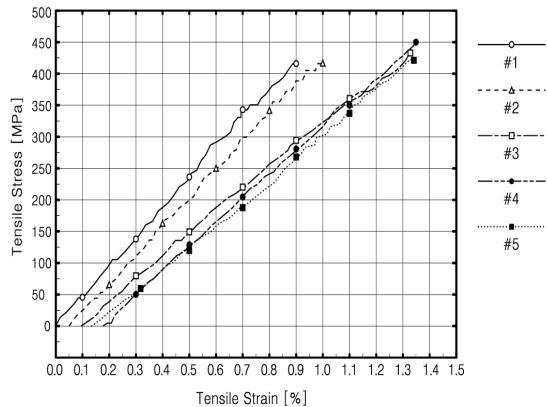


Fig. 9 Results of tensile strength test

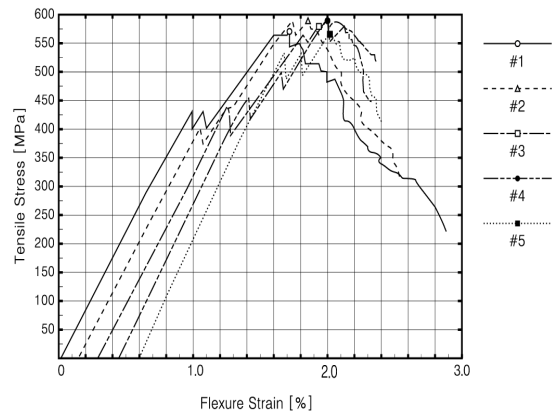


Fig. 10 Results of flexural strength test

Table 5 Results of tensile strength at low and high temperatures

		Low temperature (-30 ℃)	High temperature (80℃)
Tensile Strength (MPa)	#1	393	390
	#2	394	390
	#3	390	384
	#4	394	394
	#5	395	379
	AVG	393.7	387.4

Table 6 Results of max load and bearing strength

		Max Load (kN)	Bearing Strength (MPa)
Bearing Strength (MPa)	#1	9.22	74.17
	#2	9.14	73.74
	#3	9.47	76.69
	#4	9.28	75.29
	#5	10.27	83.33
	AVG	9.476	76.644

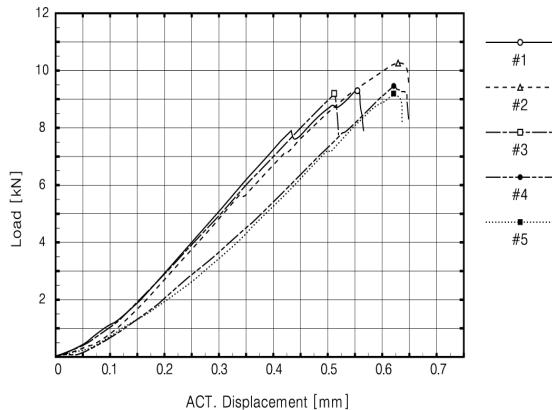


Fig. 11 Results of bearing strength test

또한, 체결강도 테스트 결과의 경우 최대하중은 약 9.7476kN, 강도의 경우 76.644MPa 가량의 결과를 보였으며 실제 사용 환경에서의 적용에는 무리가 없다고 판단되며 안전성을 확인할 수 있었고 관련 결과는 Table 6과 Fig. 11에 나타났다.

Table 6 Results of strain value through wind tunnel test

Wind speed (m/sec)	Horizontal Bending strain (μm)		Vertical column Shear strain (μm)	
	Composite material	Steel material	Composite material	Steel material
10	49	47	12	12
19.4	188	188	32	40
29	418	408	71	83
39.5	751	728	137	145
48.1	1144	1129	209	230

풍동테스트 결과 복합소재(536,800mm³)는 스틸부착대(323,250mm³)보다 수평 면적이 크에도 불구하고 변형률 값은 비슷한 값을 보였다.

또한, 부착대에서 같은 위치에 응력이 발생할 때 스틸 부착대는 허용응력이 237MPa으로 항복강도275MPa에 안전율은 1.2임을 확인하였고 복합소재부착대는 허용응력이 46.7MPa으로 항복강도 400MPa에 안전율은 8.5임을 확인하였다.

따라서, 복합소재 부착대는 스틸 부착대보다 안전율이 높으며 세로지주의 전단 변형율이 9.1% 낮음을 확인하였으며 해당 변형률에 관한 데이터는 Table 7에 나타났다.

4. 결론

본 연구를 통해 스틸의 문제점을 대체할 수 있는 친환경 소재로 인발성형을 이용한 C/GFRP 복합소재 신호등부착대의 풍하중(50m/sec)에 대한 구조적 안정성을 확인할 수 있었으며, 기계적 성질과 외부환경에 대한 내력을 실험을 통해 검증할 수 있었다.

최대 응력이 지주는 베이스 리브 연결부에서 127 MPa로 소재(SGT275)의 항복 강도 275 MPa 보다 낮게 나타났고, 부착대는 리브 연결부에서 108 MPa로 C/GFRP 부착대 교통신호등주는 다른 외력이 없는 한 자중 및 50m/s의 측면 풍하중에 대하여 구조적으로 안전한 것을 확인하였다.

C/GFRP 복합재료 가로재의 기계적 성질로 인장강도는 411MPa, 인장탄성률은 40.9GPa, 굴곡강도 578MPa, 굴곡탄성률은 35.3GPa 측정되었다. 체결

강도는 9.47kN, 기공함유율은 3.29% 수지함량은 27.4wt%으로 구조적으로 안전한 물성을 가지고 있다.

환경에 따른 내력을 평가하기 위하여 저온, 고온에서 인장시험 결과로 저온 인장강도 감소율은 6.5%, 고온 인장강도는 7.8% 감소율로 확인하게 되어 구조적으로 문제없음을 확인할 수 있었다.

대형풍동 실험을 통하여 C/GFRP 복합소재 부착대화 스틸소재 부착대를 서로 비교하여 변형률을 측정하였다. 복합소재 부착대는 수평면적이 크에도 변형률이 스틸부착대와 비슷하게 나타났으며 복합소재 부착대는 안전율이 8.5로 스틸부착대보다 높았고 지주부의 전단변형률이 9.1%낮음을 확인하였다.

인발성형공법은 복합재 구조물을 성형하는 저비용·고효율의 신개념 공정 기술로서 복합재료 내부 기공(Void) 최소화와 높은 섬유 함유율을 나타내어 강도가 우수하고 길이에 제한이 없으며 생산성이 우수하여 C/GFRP 복합재료 신호등 부착대 제작에 적합한 성형방법임을 확인하였다.

향후에 환경에 대한 내구성으로 부식성과 크리프실험, 충격실험(아이조드), 다각도로 연구함으로써 신소재의 대한 신뢰성 확보가 필요하다.

후 기

“본 연구는 정부의 재원으로 2016년도 한국연구재단(No. 2016R1A6A1A03012069)의 지원을 받아 수행된 결과임.”

REFERENCES

1. Won, J. S., and Lee, S. G., “State of the Art of Composite Materials under Extreme Condition,” KIC News, Vol. 17, No. 5, pp. 12-39, 2014.
2. Davenport, A. G., “The application of statistical concepts to the wind loading of structures,” Proc. Institution of Civil Eng., pp. 449-472, 1961.
3. Davenport, A. G., "Gust Loading Factors," Jr. of Structural Division, ASCE, Vol .93, No. 5255, pp. 11-34. 1967.
4. Vellozzi, J., and Cohen, E., "Gust Response Factors," Jr. of structural Div., ASCE, Vol. 94, No. 5980, pp. 1295-1313. 1968.
5. Ersin, A., "Minimum dynamic response of cantilever beams supported by optimal elastic springs," Structural Engineering and Mechanics, Vol. 51, No. 3, pp. 377-402, 2014.
6. Callister, W. D., and Rethwisch, D. G., Mterials Science and Engineering, Sigma press, pp. 515, 1998.
7. Clarke, J. L., Structural Design of Polymer Composites, CRC Press, pp. 270, 1996.
8. Kang, S. J., "Structural Analysis of Wireless Traffic Signal using Finite Element Method," Journal of the Korean Academia Industrial Cooperation Society, Vol. 14, No. 11, pp. 5334-5337, 2013.
9. Burda, I., Barbez, M. and Brunner, A. J., "Delamination Resistance of GFRP-epoxy Rods with Nanoparticle- and Microparticle-Modified Matrix and its Correlation with the Fracture Properties of Epoxy Nanocomposites," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 43, No. 2, pp. 292-307, 2020.
10. Bhagwat, P. M., Ramachandran, M. and Raichurkar, P., “Mechanical Properties of Hybrid Glass/Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites,” Materials Today: Proceedings Vol. 4, pp. 7375-7380, 2017.
11. Dong, C., and Davies I. J., “Optimal design for the flexural behaviour of glass and carbon fibre reinforced polymer hybrid composites,” Materials and Design Vol. 37, pp. 450-457, 2012.
12. Chung, N. Y., “A Study on Strength Evaluation of Adhesive Joints Report , Stress Analysis and Fracture Strength of Adhesive Single-Lap Joint,” The Korean Society of Mechanical Engineers Vol. 16, No. 4, pp. 667-674. 1992.
13. Moulart, R., Pierron, F. and Hallett S.R., “Full-field strain measurement and identification of composites moduli at high strain rate with the virtual fields method,” Experimental Mechanics Vol. 51, pp. 509-536, 2011.

14. Lee, H. S., and Kang, S. J., "Development and Durability Evaluation of a Bimaterial Composite Frame by Pultrusion Process," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 23, No. 2, pp. 145-151, 2014.