

GFRP 도어 임팩트 빔과 Steel 브래킷의 기계적 결합에 관한 실험적 연구

하중찬*, 신영철**, 백인석***, 이석순***.#

*경상대학교 대학원 융합기계공학과,

동성티씨에스(주), *경상대학교 대학원 기계항공공학부, ERI

An Experimental Study on the Mechanical Mounting between GFRP Door Impact Beam and Steel Brackets

Jung-Chan Ha*, Young-cheol Shin**, In-Seok Baek***, Seok-Soon Lee***.#

*School of Convergence Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, **DongsungTCS Inc.,

***School of Mechanical and Aerospace Engineering, ERI, Gyeongsang National University

(Received 13 December 2020; received in revised form 31 December 2020; accepted 11 January 2021)

ABSTRACT

The mounting performance of the GFRP(Glass fiber Reinforced Plastic) beam and the mechanical mounting of the steel bracket was studied to be mounted as a GFRP impact beam on the side door of the passenger car. Moreover, an open-hole tensile test was performed to evaluate breakage tendency based on GFRP stacking conditions. Furthermore, the tightening strength of rivets and bolts was compared using the single lap-shear tension test for the GFRP stacking pattern. Additionally, the GFRP beam and bracket mounting features were designed; moreover, the prototype and bracket were assembled. Additionally, the bracket mounting bending test and the door assembly static bending test were performed to verify the stability of the bracket mounting. In the bracket fastening bending test, no breakage occurred in the connection part between the GFRP beam and the bracket, and it showed 67% (24.4 kN) improved performance compared to steel.

In the static bending test of the door assembly, the initial average reaction force increased by 25% compared to the steel, and the performance of all FMVSS-214 regulations was satisfied. The replacement of GFRP impact beams resulted in a 30% weight reduction

Key Words : GFRP Impact Beam(유리섬유강화플라스틱 임팩트 빔), Mounting Bracket(장착 브래킷), Steel Bracket(스틸 브래킷), Three-point Bending Test(3점 굽힘시험), Mechanical Mounting(기계적 결합)

1. 서 론

최근 자동차 산업은 환경규제, 연비향상, 충돌 안

전성 규제 강화로 인해 경량화에 대한 필요성이 대두되고 있다. 차량 경량화 소재는 초 고장력강, 알루미늄합금, 마그네슘, 섬유강화플라스틱 등이 다양하게 연구되고 있다¹⁾. 현재 적용되는 임팩트 빔은 초 고장력강으로 대부분 제작되고 있으며, 복합소재로 대체 시에 경량화가 가능하다. 그 중 GFRP(glass

Corresponding Author : leess@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1622, Fax: +82-55-772-1577

fiber reinforced plastics)는 Steel 대비 70% 이상 경량화가 가능하며, 가격에서도 경쟁력이 있다^[2]. 그러나 GFRP 빔을 차량 도어에 적용하기 위해서는 Steel 과의 물성 차이로 기계적 체결이 되어야 한다. 빔을 차체에 적용되기 위해서는 이종 소재 간의 체결 안전성과 생산성이 중요한 인자이다^[3].

선행연구에서는 임팩트 빔의 브래킷(bracket) 두께와 체결 방법 변화에 따른 해석연구를 하였다^[4]. GFRP의 적층 패턴과 홀 유무에 따른 인장시험에서 강도 감소 연구와 유리섬유/아라미드 하이브리드 복합재의 손상 특성을 연구하였다^[5]. 복합재의 적층 패턴 종류에 따른 볼트 단일 접합 베어링 강도를 시험으로 비교하였다^[6]. 복합재 빔의 에너지 흡수 특성을 높이기 위해서 섬유의 전단 파손이 되도록 설계하고, 도어 조립체 굽힘시험을 연구한 사례가 있었다^[2].

본 연구에서는 GFRP 빔과 Steel 브래킷 체결방법을 제시하고, 굽힘시험에 의한 체결성능을 연구하였다. GFRP 빔의 적층 패턴을 굽힘해석과 3점 굽힘시험으로 비교하고, 리벳과 볼트에 체결성능을 비교평가 하였다. 최종 선정된 적층 패턴으로 빔을 제작하고, Steel 브래킷 체결 굽힘시험으로 성능을 비교하였다. 최종적으로 도어 정적 굽힘시험을 통해서 FMVSS-214 범규성능 만족 여부와 체결 안전성을 평가하였다.

2. GFRP 빔의 적층 패턴 선정

2.1 적용 소재

자동차 옆면에 GFRP 임팩트 빔 조립 형상을 Fig. 1에 나타냈고, GFRP 빔과 Steel 브래킷을 볼트로 체결하였다. GFRP 빔에 적용한 소재는 Glass UD prepreg (UGN-200, SK케미칼), Aramid/epoxy prepreg를 사용하였고, 시편은 섬유 함유량이 61.0 wt%가 되도록 프레스 성형하였다.

GFRP 빔에 적용된 유리섬유와 아라미드의 기계적 물성을 Table 1에 나타냈고, 인장, 굴곡 및 전단 시험을 만능시험기(INSTRON-5982)로 측정하였다. Steel 브래킷에 사용된 판재는 인장강도가 450 MPa 급 1.4t 강판을 사용하였다.

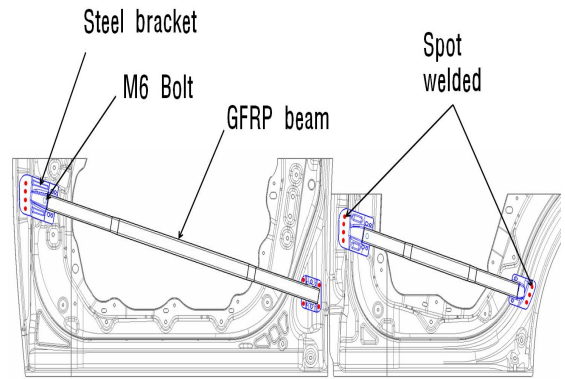


Fig. 1 Shape and mounting configuration of the side-door composite impact beams

Table 1 The material properties of the glass-fiber and the aramid epoxy composites

	Glass UD/epoxy (UGN-200)	Aramid/epoxy (200g/m ²)
ρ (kg/m ³)	1980	2060
E_x (GPa)	51.3	58.4
E_y, E_z (GPa)	22.7	16.5
G_{xy} (GPa)	4.3	5.2
ν_{xy}	0.3	0.3

2.2 적층 패턴 해석

GFRP 빔 단면은 Ha의 논문에서 연구된 사다리꼴 형상으로, 세부 치수는 아래면 30.0 mm, 윗면 27.0 mm, 높이 44.0 mm, 두께는 3.0 mm를 적용하였다^[7]. UGN-200 소재의 적층 패턴에 따른 강성 비교를 위해 3점 굽힘해석을 하였다. 굽힘해석의 경계조건은 ASTM D790의 규격을 이용하였고, 하중-변위 그래프를 비교하였다. UGN-200의 최적 적층 패턴을 도출하기 위해서 Table 2와 같이 3개의 안을 동일한 두께로 제작하였다. 3개의 안은 90° 방향의 적층 패턴을 90, ±45, 90/±45로 변경해서 비교하였고, ±30, ±60 적층 패턴은 소재 손실이 커서 검토하지 않았다. 적층 순서는 빔의 내부에서 외부로 총 24 ply가 되도록 하였다.

Table 2 Composite beams laminated patterns and thickness of UGN-200 material

	Stacking patten	Stacked quantity	Thickness (mm)
Material type [UGN-200]			
#1	[0/90/0] _{4s}	24	3.0
#2	[0/+45/-45/0] _{3s}	24	3.0
#3	[0/90/0/+45/-45/0] _{2s}	24	3.0

적층 패턴은 [0/90/0]_{4s}로 3점 굽힘해석 한 결과를 Fig. 2에 나타냈으며, 빔의 중심부에서 집중하중이 발생하는 것을 확인하였다. 해석 결과를 반력-변위 그래프로 Fig. 3에 나타냈고, Steel 빔의 3점 굽힘시험 결과도 함께 비교하였다. [0/90/0]_{4s}로 적층한 패턴이 가장 높은 강성을 보였고, Steel 빔도 유사한 강성을 보였다. 강성이 가장 우수하고, 소재 손실이 없는 [0/90/0]_{4s} 패턴을 빔 몸통부 적층 패턴으로 선정하였다. 그러나 GFRP 빔은 파손 발생으로 초기 평균반력이 감소하기 때문에 Steel 빔 보다 초기 강성을 더 높이기 위해서 중심부의 보강이 필요하였다. Ha의 논문에서 연구된 외부 보강 부의 두께, 길이, 적층 패턴을 반영하여 해석하였다⁷⁾.

GFRP 빔 중간부 400 mm 구간을 1.3t로 증가시켜 강성을 향상시켰다. GFRP 빔의 몸통부 적층 패턴은 [0/90/0]_{4s}, 중간 보강 부는 [0/0]_s + [0/90/0] + 아라미드(aramid) 2 ply를 적층하였다. 3점 굽힘해석과 빔 굽힘시험 결과를 Fig. 4에 나타냈으며, 해석과 시험이 유사한 강성을 보였다. GFRP 빔의 3점 굽힘시험에서 최대 반력은 29.5 kN, 변위는 19.0 mm으로 향상되었다.

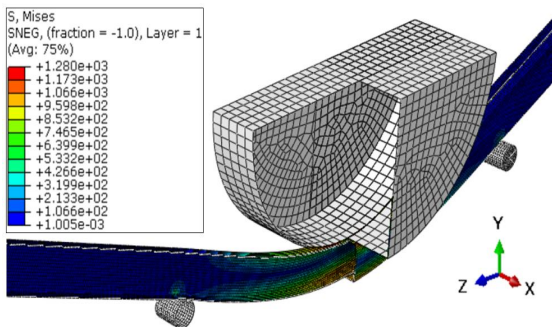


Fig. 2 Numerical results for three point-bending of composite impact beam, [0/90/0]_{4s}

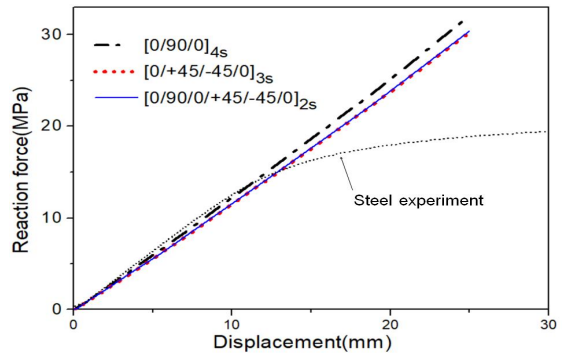


Fig. 3 Reaction forces according to stacking patten of composite beam through numerical analysis

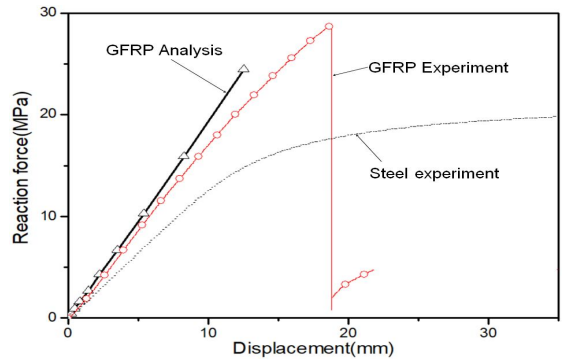


Fig. 4 Reaction forces divided by cross-section area of composite beams from numerical analysis

3. GFRP 빔과 Steel 브래킷 체결

GFRP 빔을 Steel 도어에 장착하기 위해서는 이종 소재 간 접합연구가 필요하였다. Steel 빔은 브래킷과 용접한 후, 도어 이너(inner) 패널(panel)과 스폿(spot) 용접으로 조립한다. 그러나 GFRP 빔은 브래킷에 기계적 결합이 필요하다. 이 장에서는 GFRP 빔과 Steel 브래킷이 충격에너지 흡수가 가능한 최적의 결합 방법을 연구하였다.

3.1 Open-hole 인장시험

Steel 브래킷은 GFRP 빔의 양쪽 끝단에 체결되어서, 몸통부의 적층 패턴에 따른 파손 현상을 연구하였다. 적층 패턴은 [0/0/0]_{4s}, [0/90/0]_{4s}, [0/90/0]_{4s} +

A1으로 3가지로 시험을 하였다.

Fig. 5에 (a)는 0° 만 적층하였고, (b)는 [0/90/0]_{4s}, (c)는 (b)의 적층 조건에 아라미드 1 ply를 추가한 것을 상세히 나타냈다. 시편의 크기는 25.4 x 280.0 mm로 하였고, 중간부에 홀이 없는 시편과 홀(Ø 6.0)이 있는 시편으로 제작하였다. Open-hole 인장시험은 ASTM-D5766을 참고하였으며, 테스트 결과는 Table 3에 나타났다. 홀이 있는 시편은 홀이 없는 시편보다 55~68% 강도에서 모두 파손이 발생하였다.

각 시편의 파손 경향을 Fig. 6에 나타냈으며, (a)가 하중이 가장 높게 나타났고, 0° 방향으로 시편 전 영역에서 파손되었다. (b), (c)는 하중은 낮지만, 홀 주위로 90° 방향으로 파손이 발생하였다. 그리고 홀이 없는 시편에서는 아라미드를 추가한 (c)가 (b)보다 변위와 하중이 15% 증가하였다. 그렇지만 홀이 있는 시편에서는 하중이 같았다.

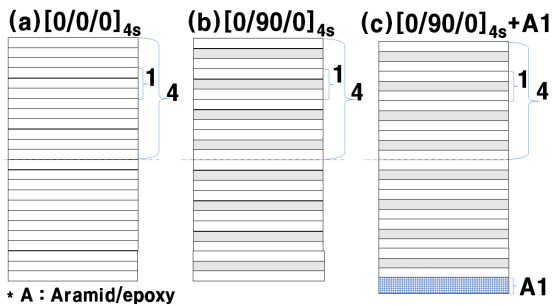


Fig. 5 Stacking sequences and lay-up number of GFRP specimens

Table 3 Tensile test results of open-hole and unhole specimens

Stacking patten		Test result	
		Strength (MPa)	Damage ratio,(%)
(a) [0/0/0] _{4s}	Unhole	988.4	68.8
	Hole	680.6	
(b) [0/90/0] _{4s}	Unhole	662.7	64.4
	Hole	426.9	
(c) [0/90/0] _{4s} +A1	Unhole	763.5	55.7
	Hole	425.0	

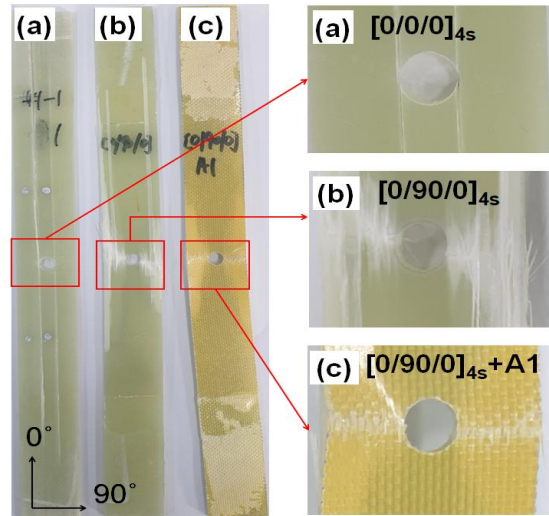


Fig. 6 Visual observation upon (a) [0/0/0]_{4s}, (b) [0/90/0]_{4s}, (c) [0/90/0]_{4s} + A1

3.2 Single lap-shear 인장시험

조립공정에서 시간을 단축하기 위해서 리벳과 볼트 체결 강도를 비교하고, GFRP 적층 패턴에 따른 체결 강도를 평가하였다. 접합부 체결 강도는 ASTM D5961의 복합재의 전단시험 규격을 적용하였다. 시험편의 형상과 치수는 Fig. 7에 나타냈고, Single lap-shear 형상으로 제작하였다. Steel과 Steel, Steel과 GFRP를 볼트와 리벳으로 체결하였다. 볼트는 M6 볼트와 너트를 사용하고, 리벳은 진합볼트호프사의 리브퀵(RIVQUICK) RQBULB ST-ST 64X170D 60/1400을 사용하였다. 그리고 GFRP의 인장 변형으로 볼트 머리부 또는 너트 부에서 이탈되는 현상을 방지하기 위해서 와셔를 추가하였다.

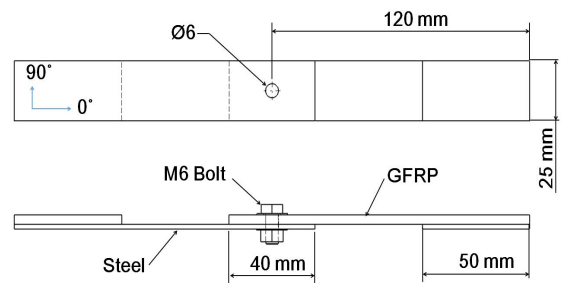


Fig. 7 Geometry of the lap-shear tensile specimens

Single lap-shear 인장시험 결과를 Table 4에서 나타냈으며, 리벳 체결은 4~5 kN, 볼트 체결은 10 kN으로 2배 이상의 하중을 나타냈다. 그리고 파손 변위는 리벳 2.5~3.7 mm, 볼트는 8.7~13.7 mm로 3배 이상의 성능을 나타냈다. 리벳 체결은 리벳이 전단 파손이 발생하였고, 볼트 체결은 Steel 시편 측면에서 크랙(crack)으로 파손되었다.

GFRP 적층 패턴에 따른 체결 파손 현상을 연구하고, 전단 하중으로 인한 파손 시의 강도와 변위를 비교하였다. GFRP의 적층 패턴은 Open-hole 인장시험에서 사용한 3가지 안을 적용하였다. 시험편은 Steel 브래킷 소재와 GFRP 소재를 볼트로 체결하였다. 시험편의 초기 사진과 시험 완료 후 파손 현상을 Fig. 8에 나타냈다. 시험편 (a)는 0°만 적층이 되어서 전단 파손이 발생하고, (b, c)는 90° 보강으로 분열 파손이 발생하는 것을 확인하였다.

Table 4 Single lap-shear joint bearing strength for bolt and rivet

Specimens concept		Load (kN)	Displacement (mm)
Steel + steel	bolt	10.3	13.7
	rivet	5.1	3.7
Steel + GFRP	bolt	10.2	8.7
	rivet	4.3	2.5

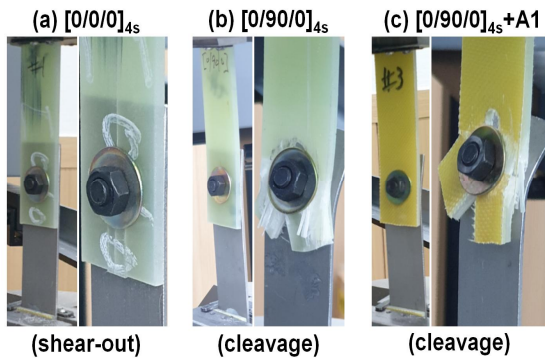


Fig. 8 Test specimen and failure configuration for bolted single lap-shear joint test

Table 5 Single lap-shear test results with GFRP stacking patterns

Specimens (Bolt joint)	Test result	
	Load (kN)	Displacement (mm)
(a) [0/0/0] _{4s}	6.1	1.8
(b) [0/90/0] _{4s}	10.3	9.5
(c) [0/90/0] _{4s} +A1	10.9	10.1

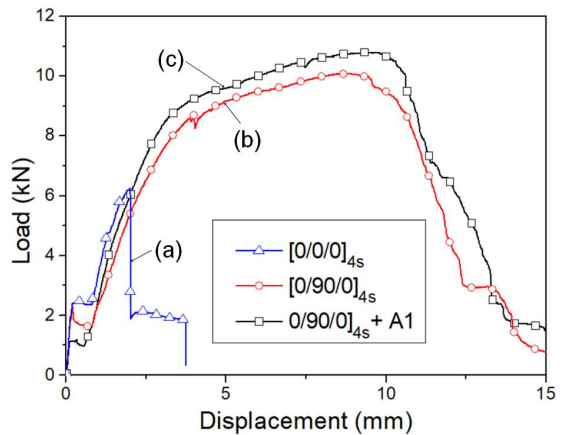


Fig. 9 Bearing stress-bearing strain curve of bolted single lap-shear test

파손 시에 발생한 하중을 Table 5에 나타냈으며, 시험편 (c)는 최대하중 10.9 kN, 변위 10.1 mm로 가장 우수한 성능을 나타냈다. 하중-변위 그래프를 Fig. 9에 나타냈고, 시험편 (a)는 전단 파손으로 하중이 급격히 떨어졌다. 시험편 (b, c)는 분열 파손이 일어나면서 서서히 파손이 발생하였다.

3.3 브래킷 체결 굽힘시험

도어 장착시험에서는 인장과 굽힘하중이 동시에 발생하므로, 이를 검증을 위해서 브래킷을 체결 후에 Steel 빔과 GFRP 빔을 굽힘시험으로 하중과 변위를 비교 평가하였다. 도어 이너 패널과 스폿 용접되는 부분은 동일한 형상을 유지하고, 빔과 조립되는 부분만 GFRP의 사각형으로 변경하였다.

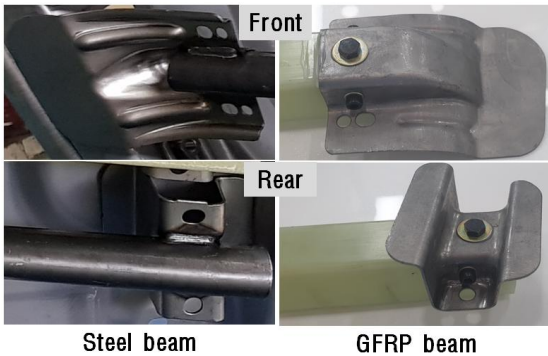


Fig. 10 Steel bracket mounted on steel and GFRP beam

Steel 브래킷과 GFRP 빔의 체결 형상을 Fig. 10 과 같이 나타냈고, 빔 체결은 3개의 볼트로 체결하였다. 그리고 GFRP 빔과 볼트 체결을 하기 위해서 브래킷의 옆면 높이를 25.0 mm로 설계 변경을 하였다.

시험 장비는 MTS 793(미국)을 사용하였고, 가압 속도는 20 mm/min으로 시험을 진행하였다. 브래킷 체결 빔을 고정하기 위한 지그(jig)는 Fig. 11과 같이 자체 제작을 하였으며, Steel 브래킷이 스폿 용접되는 부분을 M6 볼트 체결로 고정될 수 있도록 하였다.

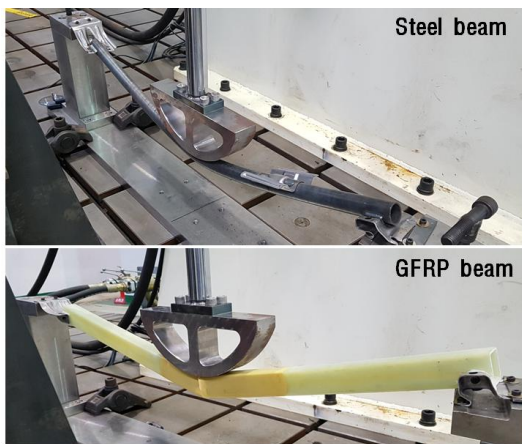


Fig. 11 Bracket mounting bending test shape of steel and GFRP

Table 6 Static bending test results for the bracket mounted steel and GFRP beams

Specimens	Bending test result	
	Force (kN)	Displacement(mm)
Steel beam	14.6	116.5
GFRP beam #1	24.4	76.0

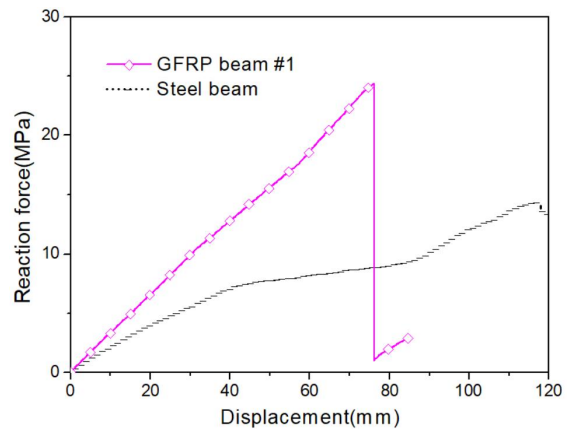


Fig. 12 Test results for static bending of steel bracket mounted on the steel and GFRP impact beams

Steel 빔과 GFRP 빔 브래킷 체결 굽힘시험 결과를 Table 6과 같이 나타냈다. Steel 빔의 최대하중은 14.6 kN, GFRP 빔은 24.4 kN으로 167% 더 높은 강도가 나왔고, 변위는 76.4 mm를 나타냈다. GFRP 빔 굽힘시험에서는 파손 변위가 19.0 mm인 것에 비해 4배 이상인 76.4 mm의 결과가 나타났다. 브래킷의 변형, 체결 부 베어링(bearing) 파손, 지지대 간격 변화로 인해서 파손 변위가 증가하였다. 시험 결과를 반력-변위 그래프로 Fig 12에 나타냈으며, Steel 빔 대비 GFRP 빔이 초기 강성이 향상된 것을 확인하였다.

3.4 도어 조립체 정적굽힘시험

열문 정적 굽힘시험으로 앞문 도어에 대해서 FMVSS-214 규정에 따라 Steel 빔과 GFRP 빔 도어 조립체의 성능과 브래킷 파손 현상을 비교평가 하였다.



Fig. 13 Experimental set-up for Static side GFRP impact beam protection test(FMVSS-214)

GFRP 임팩트 빔과 도어 이너 패널의 조립은 양산공정과 동일하게 스폿 용접으로 조립했다. 조립된 이너 패널과 아우터(outer) 패널은 마스틱 실러(mastic sealer)를 도포 후, 헤밍(hemming) 공정으로 조립하였다. 그리고 도어 전체를 전착도장을 거치고, 내부 부품들은 조립하지 않고 시험하였다. 도어 조립체 정적 굽힘시험을 Fig. 13과 같이 $\varnothing 304.0$ mm 원통형 강체를 424.0 mm까지 가압하였다. 이때 원통형 강체에 발생하는 반력을 측정하여 법규에 만족 여부 확인하였다. GFRP 도어의 테스트 결과를 Table 7에 나타냈으며, 초기 평균하중은 126%, 중기 평균반력은 119%, 최대반력은 113%로 모두 법규를 만족하였다. 그리고 임팩트 빔에서 가장 중요한 초기 평균반력은 23% 더 우수한 성능을 나타냈다.

Table 7 Static bending test results for steel and composite front door assembly

Displacement	Bending resistance load (kN)	
	Steel	GFRP #1
Initial (152.4 mm)	10.3 (103%)	12.6 (126%)
Intermediate (305.8 mm)	18.3 (117%)	18.6 (119%)
Max peak (460.0 mm)	35.6 (113%)	35.1 (113%)
weight	1.54kg	1.07kg

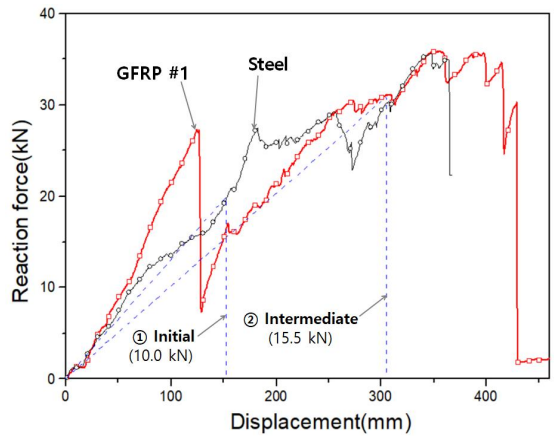


Fig. 14 Load-displacement curves results from the static bending test of the front side-door

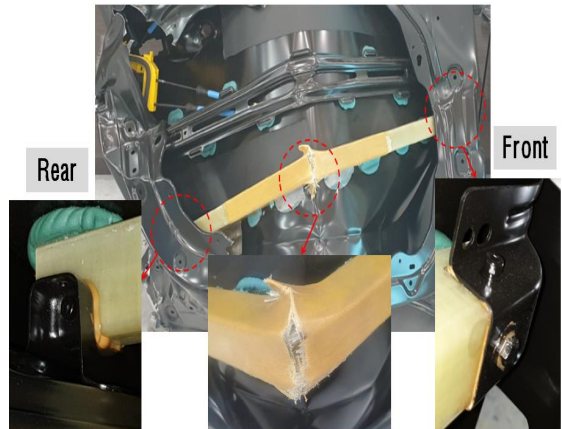


Fig. 15 Composite beam and bracket shape after static bending test

앞문 조립체 정적 굽힘시험의 결과를 Fig. 14의 그래프로 나타냈으며, 파손 시 하중은 27.2 kN, 변위는 127.0 mm가 나왔다. 파손 후 150.0 mm구간 이후는 도어 전체가 하중을 견디는 것을 확인하였다. 임팩트 빔은 초기(152.4 mm)구간의 충격 흡수 능력이 중요함을 파악하였다. 변위 424.0 mm까지 가압 후의 브래킷에 대한 상태를 Fig. 15에서 나타냈으며, 파손이나 크랙은 발생하지 않았다. 도어 조립체가 변형이 발생하면서 체결된 브래킷에 집중적으로 하중이 걸리지는 않은 것으로 파악되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 승용차의 사이드 도어에 장착되는 Steel 임팩트 빔을 GFRP 임팩트 빔으로 장착하기 위해 Steel 브래킷과 기계적 결합에 대한 설계방안을 제시하고, 체결성능의 평가 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1. Single lap-shear 시험에서는 리벳보다 볼트 체결이 10.0 kN으로 2배 이상의 높은 체결성능을 보였다. GFRP 적층 패턴은 $[0/90/0]_{4s} + A1$ 조건이 우수한 성능을 나타냈다.
2. 브래킷 체결 굽힘시험에서는 GFRP 빔이 24.4 kN으로 Steel 빔 대비 67% 향상된 강도를 보였다. GFRP 빔 파손은 76.0 mm에서 일어났고, 체결 부에서는 파손 현상은 발생하지 않았다.
3. 도어 조립체 정적 굽힘시험에서는 FMVSS-214 법규를 모두 만족하였다. Steel 빔 대비 초기 평균반력이 25% 증가, 중기 평균반력은 2% 증가, 최대반력은 유사하였다. 최대 가압 변위 424.0 mm에서도 브래킷 체결 부는 견고한 조립상태를 유지되었다.
4. GFRP 임팩트 빔을 대체 적용 시에 중량이 30% 절감되고, 충격 흡수 성능도 동일 수준을 나타냈다.

후 기

“이 논문은 산업통상자원부의 산업기술혁신산업이 지원하는 연구과제(10081340)로 수행되었음.”

REFERENCES

1. Jeon, N. K., Jeong, T. E., Rhee, S. H., Kam, D. H., “Evaluation of CFRP/Steel/Aluminum Three Layer Joining with Self-Piercing Rivet,” *Journal of Welding and Joining*, Vol. 37, No. 1, pp. 56-51, 2019.
2. Lim, T. S., and Lee, D. G., “Mechanically Fastened Composite Side-Door Impact Beams for Passenger Cars Designed for Shear-Out Failure Modes,” *Composite Structures*, Vol. 56, No. 2, pp. 211-221, 2002.
3. Kim, Y., Park, K. Y., and Kwak, S. B., “Mechanical fastening and joining technologies to using multi mixed materials of car body,” *Journal of Welding and Joining*, Vol. 33, No. 3, pp. 12-18, 2015.
4. Kang, S. J., “Strength of Pipe Type Door Impact Beam with changed Bracket Mounting Method and TRP Application,” *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 24, No. 4, pp. 379-385, 2016.
5. Shaari, N., MF Abdul Wahab, N. S. Shaari, and A. Jumhat. "Unhole and open hole tensile properties of hybrid Kevlar/glass fiber polymer composites with different stacking sequence," *Materials Today: Proceedings*, 2020.
6. Lee, M. K., Lee, J. W., Yoon, D. H., & Kim, J. H., “Experimental Assessment of Bolted Single Lap Joint Strength for Laminates in Advanced Composite Materials,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 41, No. 10, pp. 983-989, 2017.
7. Ha, J. C., Oh, S. H., Baek, I. S., & Lee, S. S., “Design Improvement of Composite Door Section Impact Beam by Three-Point Bending Analysis,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 19, No. 6, pp. 80-87, 2020.