

IIHS 충격해석에 근거한 구간 조합 복합재료 범퍼 빔 개발

정찬희* · 함석우* · 김경석** · 전성식*†

Development of the Piecewisely-integrated Composite Bumper Beam Based on the IIHS Crash Analysis

Chan-Hee Jeong*, Seok-Wu Ham*, Gyeong-Seok Kim**, Seong S. Cheon*†

ABSTRACT: The aim of the current work is to characterise a piecewisely-integrated composite bumper beam based on the IIHS bumper crash protocol. IIHS bumper crash FE analysis for an aluminium type bumper beam was carried out to get the information about the dominant loading types at several regions in the bumper beam during crash. In the meantime, robust stacking sequences against tension and compression have been searched for using FE analysis of a coupon type model. After determining most effective stacking sequences for tension and compression, three-point bending simulation was preliminarily carried out to investigate the combination performance of them. Finally, IIHS bumper crash FE analysis for the piecewisely-integrated composite bumper beam, which consisted of the combination of tension effective stacking sequence and compression efficacious stacking sequence, was conducted and the result was compared with other types of composite bumper beams. It was found that the newly suggested piecewisely-integrated composite bumper beam showed superior crashworthy behaviour to those of uni-modal stacking sequence composite bumper beams.

초 록: 본 연구에서는 IIHS기준 범퍼 충돌해석을 통하여, 구간 조합 복합 범퍼 빔의 특성 분석하였다. 충돌 시 범퍼 빔의 5개 영역에서 지배적인 하중 유형에 대한 정보를 얻기 위해 AI 범퍼 빔에 대한 IIHS 범퍼 충돌 해석이 진행되었다. 또한, 항공우주 분야에서 빈번히 사용되는 5가지 적층순서 중, 인장 및 압축하중에 가장 효과적인 적층순서가 복합재료 쿠폰 해석을 통해 결정되었다. 이와 더불어, 결정된 두가지 복합재료의 적층순서를 적용한 복합재료 범퍼 빔에 대해 3점 굽힘 해석이 수행되었다. 마지막으로, IIHS 범퍼 충돌 해석을 진행하여 구간 조합으로 이루어진 복합재료 범퍼 빔을 다른 유형의 복합 범퍼 빔과 비교하였다. 제안된 구간조합 복합재료 범퍼 빔은 단일 적층순서로 이루어진 복합재료 범퍼 빔에 비해 우수한 충돌 특성을 나타내었다.

Key Words: 범퍼 빔(Bumper beam), IIHS 범퍼 충돌(IIHS bumper crash), 구간조합 복합재료(Piecewisely-integrated composite, PIC), 적층순서(Stacking sequence), 3축특성(Triaxiality), 파손지수(Failure index)

1. 서 론

최근 차량구조는 경량화를 통하여, 연비를 늘리거나 전 기자동차용 신 플랫폼으로 설계되는 방향으로 진행되고 있

다. 이에 따라 기존의 재료보다는 새로운 특성과 물성을 갖는 재질이 주목을 받고 있다. 현재 산업계에 적용되고 있는 새로운 재질로는 고장력 강, 비철금속, 열가소성 플라스틱, 다공성 구조 및 복합재료가 대표적으로 여겨지고 있으며, 특

Received 5 February 2018, received in revised form 5 February 2018, accepted 6 February 2018

*Department of Mechanical Engineering, Kongju National University

*†Department of Mechanical Engineering, Kongju National University, Corresponding author (E-mail: sscheon@kongju.ac.kr)

**Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

히 복합 재료는 금속 및 기타 소재에 비해 비강성 및 비강도가 우수하여, 광범위한 응용 분야에 적용되고 있다. 최근에는 자동차 구조에서 상당 부분에 경량금속 및 복합재료가 적용되고 있고, 특히 복합재료 뿐 아니라 알루미늄 등 경량화를 목적으로 한 범퍼빔에 대한 관심이 집중되고 있다.

자동차 범퍼 빔은 알려진 바와 같이 외부 충격으로 부터 승객과 차량을 일차적으로 보호하는 역할을 한다. 또한 범퍼 빔은 프런트 사이드 멤버, 크로스 멤버 및 펜더 에이프런과 같은 다른 자동차 구조물과 함께 외부 충돌 에너지를 흡수하도록 설계되고 있다.

Cheon 등[1]은 승용차를 위한 새로운 유형의 하이브리드 복합 범퍼 빔을 제안하고 FE 해석과 충돌 시험을 수행하였다. Hosseinzadeh 등[2]은 저속 충돌에 대한 합성 범퍼 빔 설계를 위한 파라메타 연구를 수행하였다. Davoudi 등[3,4]은 복합 재료의 기계적 특성과 승용차 범퍼 빔의 개념 설계를 제안하였다. Belingardi 등[5]은 펄트루전으로 제조된 복합 범퍼 빔에 대해 수치 해석으로 최적화 된 단면형상을 제안하였으며, Kim 등[6]은 최적화 된 자동차 하이브리드 복합 범퍼 빔에 관한 연구를 진행하였다. 이처럼 현재까지의 연구된 바에 따르면 복합재료 범퍼 빔에 대한 연구는 다양하게 시도되고 있으나, 범퍼 빔 전영역에 단일 적층 순서를 적용하는 것이 일반적이었다.

범퍼 빔의 경우 고속 충돌 보다는 저속 충돌에서 효과적인 역할을 하는 것으로 알려져 있으며[7], 범퍼의 특성을 입증하기 위해서는 고속도로 안전 연구소(Insurance Institute for Highway Safety, IIHS) 범퍼시험[8]을 만족시킬 필요가 있다. 이 시험법에서는 차체 앞부분이 볼록한 벽면으로 충돌하게 되는데, 벽면 내부는 벌집 구조(Honeycomb)로 이루어져 있어서, 범퍼 빔 입장에서는 각 부분이 서로 다른 하중, 즉 인장 혹은 압축 하중을 받게 된다. 복합재료에 있어서는 인장에 강한 적층순서가 있고, 압축에 강한 적층순서가 따로 존재하는 데도 불구하고, 복합재료 범퍼빔을 일률적인 적층순서로 제조하는 것은 비효율적일 수 있다[9,10]. 이에 따라, 본 연구에서는 기존에 연구되었던 알루미늄 범퍼빔에 대해 IIHS 정면충돌해석을 수행하고, 알루미늄 범퍼빔의 각 부분에 주로 인장하중이 작용하는 곳과 압축하중이 작용하는 곳을 분류하고, 이와 더불어, 항공우주업에서 대표적으로 많이 쓰이는 복합재료 적층순서 5개에 대해 인장해석을 수행하여, 인장에 강한 적층순서와 압축에 강한 적층순서를 결정하였다. 범퍼 빔 해석에 앞서서 3점 굽힘해석을 통하여, 단일 적층순서로 이루어진 복합재료에 비해 인장에 강한 적층순서와 압축에 강한 적층순서를 조합한 빔에 대한 경쟁력을 확인하였다. 또한 단일 적층순서로 이루어진 복합재료 범퍼빔과 구간조합 복합재료(Piecewisely-integrated composite, PIC) 범퍼빔에 대한 IIHS 정면충돌해석을 수행하여, 구간조합 복합재료 범퍼빔의 특성을 분석하고 향후 사용가능여부(Feasibility)에 대해 연구

를 진행하였다.

2. AI 범퍼빔의 IIHS 저속충돌해석

전술한 바와 같이 고속도로 안전 연구소는 자동차 범퍼의 파손 정도를 조사하기 위해 볼록한 모양의 벽으로 10 km/h로 범퍼 저속 충돌 시험[8]을 제안하였다.

본 연구에서는 LS-DYNA를 사용하여 기존의 알루미늄 범퍼 빔에 대한 IIHS 범퍼 충돌 해석을 수행하여, 충돌 시 범퍼 빔의 일정 구간마다 지배적인 하중 특성에 대한 분석을 하였다. Fig. 1은 알루미늄 범퍼 빔에 대한 IIHS 범퍼 충돌 해석 모델을 보여준다. 무게중심(Center of gravity, C.O.G.) 점에 승용차의 평균 중량인 2t와 적절한 질량 관성 모멘트를 갖는 무게 중심의 위치는 차량 전체 모델을 기준으로 계산되어 적용하였다.

Fig. 2는 범퍼 빔의 단면을 나타낸다. 그림과 같이 범퍼 빔의 중앙에 리브가 있는 직사각형으로 구성되어 있다.

또한 범퍼 빔을 Fig. 3과 같이 5개의 균등한 영역 (A,B,C,D

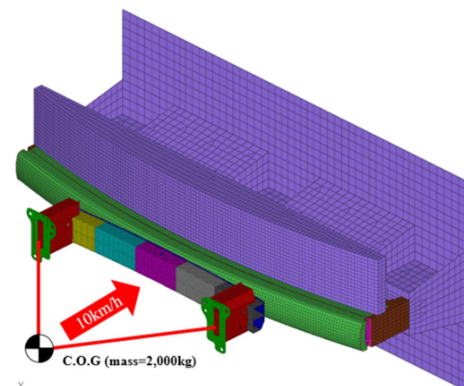


Fig. 1. IIHS bumper crash analysis (Full overlap)

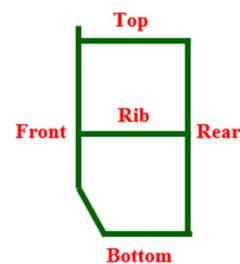


Fig. 2. The cross-section of the bumper beam

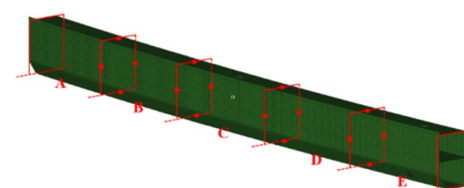


Fig. 3. Five regions of bumper beam

Table 1. Signs of triaxiality of each region

	A	B	C	D	E
Front	-	-	-	-	-
Rear	+	+	+	+	+
Top	+	-	+	-	+
Bottom	-	-	+	-	-
Rib	-	-	-	-	-

및 E)으로 나누어 각 영역의 하중 유형을 분석하였다. 분석 방법으로는, 식 (1)과 같이 정의된 3축 특성(Triaxiality) 값을 이용하였다. 구간별로 계산된 3축 특성값이 양일 때는 인장하중이 주로 작용하고, 음의 값일 때는 압축하중이 주로 작용하는 구간을 의미한다[11].

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3)$$

여기서 η 는 3축 특성값, σ_m 은 평균응력, $\bar{\sigma}$ 는 von Mises 응력, 그리고 σ_1 , σ_2 및 σ_3 은 각 방향의 주응력을 나타낸다.

전술한 바와 같이, x, y 및 z축에 각각 작용하는 응력을 정의된 식 (1), (2), (3)을 이용하여 계산한 결과 3축 특성값의 부호에 대해 Table 1에 정리되었다.

IIHS 범퍼 충돌기준 해석을 진행한 결과 알루미늄 범퍼 빔은 위치에 따라 다른 유형의 하중이 지배적인 것으로 분석되었다.

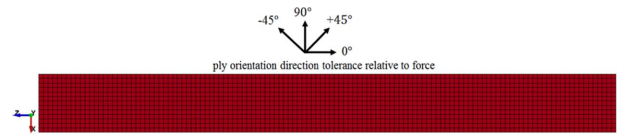
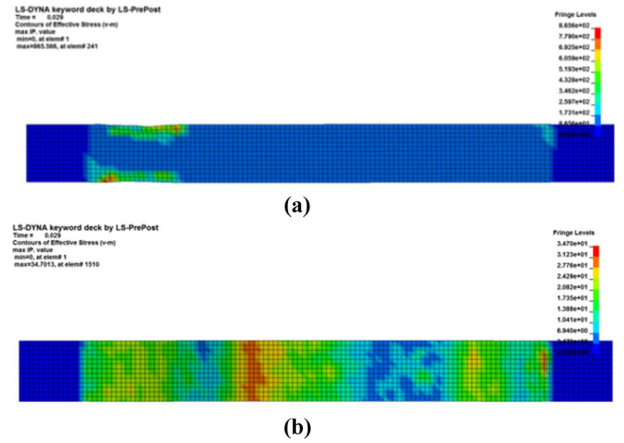
3. 적층순서에 따른 복합재료 쿠폰의 인장 및 압축 특성

본 연구에서는 범퍼 빔의 영역별로 인장 혹은 압축에 강한 적층순서를 선정하기 위하여 항공우주업에서 대표적으로 많이 쓰이는 5가지 적층순서[12,13], 즉, $[\pm 45/90/0_2]_{3S}$, $[\pm 5/\pm 45/90]_{3S}$, $[0_2/90/\pm 45]_{3S}$, $[\pm 45/\bar{0}]_{6S}$ 및 $[90/0/\bar{0}]_{6S}$ 를 선정하고, 이 5가지 적층순서로 이루어진 복합재료 인장시편에 대한 준 정적 인장 및 압축 해석을 진행하였다. ASTM D3039[14]에서 제시된 시험편을 기준으로 쿠폰이 모델링 되었으며, 고려된 재료는 직교 이방성의 S-glass/Epoxy 복합재료 (UNG150, SK chemical)[15]를 사용하였다.

향후 PIC 범퍼빔의 IIHS 범퍼충돌해석에서는 Kevlar/Epoxy(Kevlar 49, Dupont)[16] 복합재료도 사용되었기에, 두 개의 복합재료 물성을 함께 Table 2에 나타내었다. LS-DYNA에서 제공하는 MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE_

Table 2. Mechanical properties of composite materials

Properties	S-glass/Epoxy[12]	Kevlar49//Epoxy[13]
Axial Modulus, $[E_1]$	43.5 GPa	76.8 GPa
Transverse Modulus, $[E_2]$	11.5 GPa	5.5 GPa
Shear modulus, $[G_{12}]$	3.45 GPa	2.07 GPa
Shear modulus, $[G_{23}]$	3.45 GPa	1.4 GPa
Poisson's ratio, $[\nu_{12}]$	0.3	0.34
Density, $[\rho]$	1520 kg/m ³	1380 kg/m ³
Axial tensile strength, $[X^t]$	1540 MPa	1380 MPa
Axial compressive strength, $[X^c]$	900 MPa	276 MPa
Transverse tensile strength, $[Y^t]$	49 MPa	27.6 MPa
Transverse compressive strength, $[Y^c]$	200 MPa	138 MPa
In-plane shear strength, $[S]$	69 MPa	44 MPa

**Fig. 4.** Configuration of tension and compression model**Fig. 5.** Composite coupon simulation: (a) Tension, (b) compression**Table 3.** Tension analysis for S-glass epoxy composite coupon

Stacking sequence	First ply failure load (kN)	Absorbed energy (kJ)
$[\pm 45/90/0_2]_{3S}$	32.2	2.53
$[\pm 5/\pm 45/90]_{3S}$	27.5	1.60
$[0_2/90/\pm 45]_{3S}$	10.0	1.01
$[\pm 45/\bar{0}]_{6S}$	34.1	3.17
$[90/0/\bar{0}]_{6S}$	31.9	1.84

Table 4. Compression analysis for S-glass epoxy composite coupon

Stacking sequence	First ply failure load (kN)	Absorbed energy (kJ)
$[\pm 45/90/0_2]_{3S}$	13.9	2.30
$[\pm 5/\pm 45/90]_{3S}$	9.6	1.88
$[0_2/90/\pm 45]_{3S}$	10.1	2.05
$[\pm 45/\bar{0}]_{6S}$	14.1	2.36
$[90/0/\bar{0}]_{6S}$	33.1	2.45

KEYWORD 재료모델이 사용되었다. Fig. 4는 ASTM D3039 규격에 의거하여 모델링 된 인장, 압축 시험편을 보여주며 Fig. 5는 분석된 인장 및 압축 해석의 예를 보여준다.

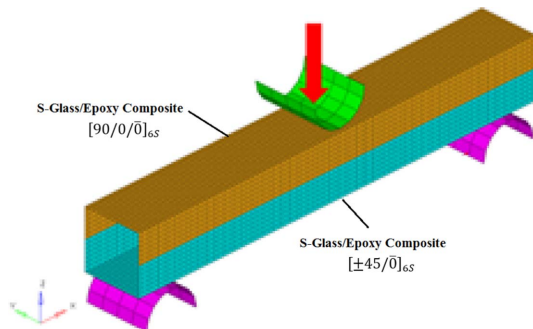
Table 3 및 4에서 나타난 바와 같이 첫번째 플라이의 파손 하중과 흡수에너지의 최대값으로부터 인장특성에 가장 강한 적층순서는 $[\pm 45/\bar{0}]_{6S}$ 로 나타났으며, 압축특성에 가장 강한 적층순서는 $[90/0/\bar{0}]_{6S}$ 로 확인되었다.

4. 3점 굽힘 해석 및 결과

본 연구에서는 복합재료가 적용된 IIHS 범퍼 충돌 해석에 앞서 인장 및 압축특성이 지배적인 적층순서의 성능을 평가하기 위하여 3점 굽힘 해석이 선행적으로 진행되었다. 유한요소해석모델은 ASTM D7264[17]에 기술된 시험편에 의거하여 모델링 되었으며, Fig. 6은 3점 굽힘 해석의 유한요소모델을 나타내고 있다.

상부 및 하부로 구분된 3점 굽힘 해석 모델의 적층순서 구성으로는, 압축특성이 지배적인 상부는 $[90/0/\bar{0}]_{6S}$ 로 구성되어 있으며, 인장특성이 지배적인 하부는 $[\pm 45/\bar{0}]_{6S}$ 로 이루어져 있다. 그리고 복합 구조를 가진 모델과의 비교를 위해 앞서 진행된 5가지의 적층순서의 3점 굽힘 해석도 진행 되었으며, Table 5와 같이 결과를 비교하였다.

해석 결과로는 상, 하부로 구분된 적층순서의 복합구조를 가진 모델은 단일 적층순서로 이루어진 모델에 비해 높은 하중 및 흡수에너지 특성을 보였다. 이에 따라 단일 모델에 비해 복합구조 모델이 더 우수한 굽힘 특성을 보임을

**Fig. 6.** FE model for three-point bending analysis**Table 5.** Bending analyses for S-glass epoxy composite beam

Stacking sequence	First ply failure load (kN)	Absorbed energy (kJ)
$[\pm 45/90/0_2]_{3S}$	7.10	170.4
$[\pm 5/\pm 45/90]_{3S}$	6.37	181.1
$[0_2/90/\pm 45]_{3S}$	6.44	180.9
$[\pm 45/\bar{0}]_{6S}$	6.96	181.3
$[90/0/\bar{0}]_{6S}$	6.37	191.4
PIC	7.84	210.0

확인할 수 있었다.

5. IIHS 범퍼 충돌 해석 및 결과

범퍼 빔의 파손을 계산하기 위해 본 연구에서는 Tsai-Wu 파손 이론을 사용하였다. Tsai-Wu 파손 이론은 식 (4)와 같이 정의된다[18].

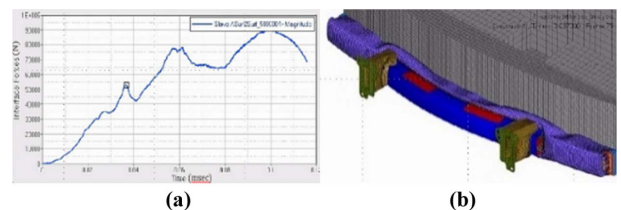
$$f = F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j < 1, \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (4)$$

여기서 F_i 와 F_{ij} 는 강도 텐서로 재료의 인장강도, 압축강도와 전단 강도들의 조합된다[18]. PIC 범퍼 빔은 Table 1에서 보여지는 바와 같이 범퍼 빔에 작용하는 인장 및 압축특성이 분석되어 범퍼 빔의 각 구간에 대한 적층 순서가 결정되었다. 즉, 압축하중이 지배적인 구간은 $[90/0/\bar{0}]_{6S}$, 인장하중이 지배적인 구간은 $[\pm 45/\bar{0}]_{6S}$ 로 구성되었다.

Table 6은 IIHS 범퍼 충돌 해석의 결과를 나타내며, Fig. 7은 시간-하중 선도를 나타낸다. Table 6의 변형량은 가로방

Table 6. IIHS bumper crash analysis results

Stacking sequence	Deformation (mm)	Max failure index
$[\pm 45/90/0_2]_{3S}$	8.15	21.89
$[\pm 5/\pm 45/90]_{3S}$	9.41	17.03
$[0_2/90/\pm 45]_{3S}$	7.94	9.55
$[\pm 45/\bar{0}]_{6S}$	8.54	3.12
$[90/0/\bar{0}]_{6S}$	9.22	3.01
S-glass/Epoxy - PIC	7.74	1.67
Kevlar49/Epoxy - PIC	5.73	1.20

**Fig. 7.** IIHS bumper simulation: (a) External force vs. time curve, (b) deformation of PC bumper beam

향의 중심 위치에서 리브의 수평 길이 변화로 계산되었다.

참고로, Table 6에서 Kevlar49/Epoxy PIC 경우를 제외하고는 모두 S-Glass/Epoxy 복합재료의 결과를 보여준다. 인장 및 압축특성에 따라 적층순서가 고려된 PIC 범퍼 빔은 단일 적층순서로 이루어진 범퍼 빔에 비해 최대파손지수가 낮아졌으나, 여전히 1을 초과하므로 범퍼 빔의 파손이 존재할 수 있을 것이다. 따라서 향후 파손가능성을 낮추기 위해 복합재료의 두께 등에 대한 최적화가 필요하지만 Table 6에서와 같이, PIC 범퍼 빔은 단일 적층순서로 이루어진 범퍼 빔에 비하여 변형량 및 최대파손지수의 특성에서 더 높은 경쟁력을 가질 수 있음을 확인하였다.

6. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 PIC 범퍼 빔에 대한 IIHS 범퍼 충돌 해석을 진행하였다. IIHS 범퍼 충돌 해석에 앞서 선행적으로 두 가지 연구가 진행되었다. 첫째, 규격에 의거하여 5가지 복합재료 적층순서의 인장 및 압축해석이 진행되었으며 인장특성이 지배적인 적층순서는 $[\pm 45/0]_{6S}$, 압축특성이 지배적인 적층순서는 $[90/0/0]_{6S}$ 로 나타남을 확인하였다. 둘째, 상,하부로 구분된 적층순서의 복합구조를 가진 빔 형상의 3점 굽힘 해석이 진행되었으며 단일 적층순서로 이루어진 빔 형상보다 더 우수한 굽힘 특성을 보임을 확인하였다. 선행적으로 이루어진 결과를 토대로 IIHS 범퍼 충돌 해석을 진행한 결과, Kevlar49/Epoxy PIC 범퍼 빔이 변형량 및 최대파손지수 특성에서 다른 범퍼 빔보다 우수한 특성을 보임을 확인하였다. 하지만 파손지수가 1을 초과하므로 향후, 파손지수의 최소화를 위해 두께 최적화가 필요하다. 또한, 현재는 범퍼빔의 결정된 5개 구간내에서 3축 특성값을 계산하였으나, 자동으로 구간을 결정할 수 있는 방법이 요구될 것으로 사료되고 있다.

후 기

본 연구는 국토교통부, 교통물류연구사업(이동불편 교통체계 개선기술 개발, 16TLRP-B103929-02)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 것임.

REFERENCES

- Cheon, S.S., Choi, J.H., and Lee, D.G., "Development of the Composite Bumper Beam for Passenger Cars," *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, pp. 491-499.
- Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M.M., and Lessard, L.B., "Parametric Study of Automotive Composite Bumper Beams Subjected to Low-velocity Impacts," *Composite Structures*, Vol. 68, 2005, pp. 419-427.
- Davoodi, M.M., Sapuan, S.M., Ahmad, D., Ali, A., Khalina, A., and Jonoobi, M., "Mechanical Properties of Hybrid Kenaf/glass Reinforced Epoxy Composite for Passenger Car Bumper Beam," *Materials & Design*, Vol. 31, 2010, pp. 4927-4932.
- Davoodi, M.M., Sapuan, S.M., Ahmad, D., Aidi, A., Khalina, A., and Jonoobi, M., "Concept Selection of Car Bumper Beam with Developed Hybrid Bio-composite Material," *Materials & Design*, Vol. 32, 2011, pp. 4857-4865.
- Belingardi, G., Beyene, A.T., and Koricho, E.G., "Geometrical Optimization of Bumper Beam Profile Made of Pultruded Composite by Numerical Simulation," *Composite Structures*, Vol. 102, 2013, pp. 217-225.
- Kim, D.H., Kim, H.G., and Kim, H.S., "Design Optimization and Manufacture of Hybrid Glass/carbon Fiber Reinforced Composite Bumper Beam for Automobile Vehicle," *Composite Structures*, Vol. 131, 2015, pp. 742-752.
- Marzbanrad, J., Alijanpour M., and Kiasat, M.S., "Design and Analysis of an Automotive Bumper Beam in Low-speed Frontal Crashes," *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, No. 8, 2009, pp. 902-911.
- Bumper Test Protocol (Version VI)*, Insurance institute for highway safety, April 2007.
- Jeong, C.H., Oh, H.S., and Cheon, S.S., "A Study on the Composite Bumper Beam with Multiple Phase Material Properties," *Proceedings of KSCM, 2017 Spring Conference*, Sejong, South Korea, 2017.
- Jeong, C.H., Oh, H.S., Ham, S.W., and Cheon, S.S., "A Study of a Piecewisely-angled Fibre Composite Beams Based on 3 Point Bending Analysis," *Proceedings of KSCM, 2017 Fall Conference*, Daejeon, South Korea, 2017.
- Bai, Y., Teng, X., and Wierzbicki, T., "On the Application of Stress Triaxiality Formula for Plane Strain Fracture Testing," *J. Engineering Materials & Technology, Trans. ASME*, Vol. 131, 2009, 021002.
- Cheon, S.S., Lee, D.G., and Jeong, K.S., "Composite Side-door Impact Beams for Passenger Cars," *Composite Structures*, Vol. 38, 1997, pp. 229-239.
- Allaire, G., and Delgado, G., "Stacking Sequence and Shape Optimization of Laminated Composite Plates via a Level-set Method," *J. the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 97, 2016, pp. 168-196.
- Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (ASTM D3039/3039M.)*, ASTM International, West Conshohocken.
- Kim, B.J., Kim, H.S., and Lee, D.G., "Design of Hybrid Steel/Composite Circular Plate Cutting Tool Structures," *Composites Structures*, Vol. 75, 2006, pp. 250-260.
- Kasavajhala, A.R.M., and Gu, L., "Fracture Analysis of Kevlar-49/Epoxy and E-Glass/Epoxy Doublers for Reinforcement of Cracked Aluminum Plates," *Composites Structures*, Vol. 93, 2011, pp. 2090-2095.
- Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials (ASTM D7264/7264M)*, ASTM International, West Conshohocken.
- Lee, D.G., and Suh, N.P., *Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures*, Oxford University Press, New York, 2006.