

전기자동차 프레임 소재에 따른 충돌해석에 관한 연구

김도균*, 고동현*, 이상찬*^{*,#}

*목포대학교 기계공학과

Collision Analysis Based on Electric Vehicle Frame Material

Do-Kuen Kim*, Dong-Hyeon Ko*, Sang-Chan Lee*^{*,#}

*Mechanical Engineering, Mokpo National University

(Received 16 September 2021; received in revised form 6 October 2021; accepted 14 October 2021)

ABSTRACT

Reducing the weight of automobiles is a significant global developmental task. Two materials are used to lighten automobiles: aluminum and CFRP frames. Aluminum is a non-ferrous metal, and CFRP is a composite material. They are lighter and harder than other materials. The two materials were used for the collision analysis. Subsequently, the two cases were compared. Three cases were considered for the collision analysis: head-on collision, partial head-on collision, and side collision at a speed of 60 km/h. The three cases were compared and analyzed considering the materials used to understand the difference between aluminum and CFRP and their collision characteristics.

Keywords: CFRP(탄소 섬유 강화 플라스틱), Composite Material(복합 소재), Collision Analysis(충돌해석), Car Frame(차량 프레임)

1. 서 론

자동차의 연료소비는 환경오염 문제에 있어서 항상 대두되는 문제였다. 내연기관 자동차의 온실가스 배출량은 다른 부문에 있어 많은 비중을 차지하고 있으며 운송기계의 에너지원인 휘발유와 경유는 대기오염의 주요원인으로 지적되고 있다. 세계적으로 온실가스 및 대기오염물질로 인한 피해를 최소화하기 위하여 다양한 정책이 시행되고 있으며 이러한 운송기계의 에너지 소비를 줄이거나 혹은 친환경적인 에너지원의 개발이 원활히 진행되고 있으며 전기자동차 또한 그러한 기술개발 중 하나이다. 자동차의 에너지 소비를 감소하는 방법으로써 연비

향상을 선택할 수 있고 이러한 연비 향상은 자동차의 경량화로 이루어 낼 수 있다. 자동차의 주 재료였던 스틸을 탄소섬유 복합소재로 활용할 수 있다. 탄소섬유 복합소재는 보강재로 수지, 세라믹, 금속 등을 모재로 사용하며 탄소섬유강화플라스틱 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic), 탄소섬유강화세라믹 CFRC(Carbon Fiber Reinforced Ceramic), 탄소섬유강화금속 CFRM(Carbon Fiber Reinforced Metal) 등이 있다. 탄소섬유 복합소재는 뛰어난 성형성과 고온에서의 높은 강도를 조합하여 설계한 고성능소재로 항공기, 우주 왕복선 및 구조재 등에도 핵심 재료로 이용되고 있다. 탄소섬유 복합재료 뿐만 아니라 비철금속(Al, Mg), 고강성 플라스틱 또한 자동차의 경량화 소재에 대하여 연구되고 있으며 그 중 플라스틱 소재의 기능성에 따른 다양한 소재 개발과 공정에 대한 비용절감이 큰 비중을 차지하고

Corresponding Author : sclee@mokpo.ac.kr

Tel: +82-61-450-2417, Fax: +82-61-450-2417

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있다. 탄소섬유는 약 75% 정도 스틸보다 가벼우며 강도와 탄성은 7~10배 우수한 특성을 지니고 있어 스틸을 대체할 수 있는 가장 이상적인 소재이다 자동차의 중량이 10% 정도 감소되면 6~8% 연료가 절감되므로 연비 향상에 있어 경량화에 적합한 소재로 적극 도입되고 있다.

친환경적인 소재로 전기자동차 HEV(Hybrid Electric Vehicle), EV(Electric Vehicle) 시장 또한 점차 활발해지고 있는 상황이며 탑승자의 안전, 편의에 대한 요구가 높아지고 있다. 전기자동차는 Battery를 포함한 전용 부품들로 인하여 전체적인 중량이 증가됨에 있어 자동차의 경량화는 반드시 해결되어야 할 것이다.^[1]

본 연구에서는 이러한 전기자동차의 프레임 소재를 Aluminum과 CFRP로 채택하여 정면충돌, 부분정면충돌, 측면 충돌^[2]로 나누어진 충돌해석을 수행하여 전체적인 변형량, 응력을 파악하여 비철금속과 탄소섬유 복합소재의 비교를 진행하였다.

2. 해석 모델

2.1 해석조건 및 모델 선정

본 논문에서 다루고자 하는 전기자동차 프레임의 모델에서 소재에 따른 충돌 시 변형량 및 응력을 측정하여 소재 선점을 진행하기 위하여 ANSYS 프로그램을 이용하여 충돌해석 시뮬레이션을 수행하였다.

비철금속인 Aluminum과 탄소섬유 복합소재인 CFRP를 각각 case 1, case 2로 나누었으며, Fig. 1은 프레임의 3D 모델링을 나타내었고 프레임은 전장

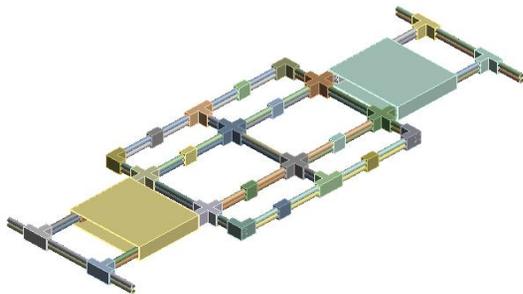


Fig. 1 Car frame boundary conditions

Table 1 Material properties of Aluminum

Property	Unit	Value
Density	kg/m ⁻³	2770
Tensile Modulus	GPa	164
Tensile Strength	MPa	280
Shear Modulus	GPa	26.7
Young's Modulus	GPa	71
Poisson's Ratio		0.33

Table 2 Material properties of CFRP

Property	Unit	Value	
Density	kg/m ⁻³	1770	
Tensile Strength	MPa	1850	
Elongation at Break	%	2.20	
Young's Modulus	X	GPa	164
	Y,Z		8.6
Poisson's Ratio	X	0.27	
	Y,Z	0.4	

3500mm, 전폭 1200mm로 설계하였다. 프레임의 사용되는 파이프는 외경 40mm, 내경 32mm이며 길이는 접합 부분에 따라 1670mm, 1490mm, 1190mm, 1100mm, 900mm, 504mm, 292mm, 247mm의 길이의 파이프를 설계하였다. 또한 파이프의 연결 부분들은 Aluminum의 물성치를 입력하였으며 파이프의 물성치를 각각 Aluminum과 CFRP를 입력하여 설계 변수로 선정하였다. 원형 파이프^[3]에 설계변수가 적용되어지므로 CFRP는 이방성^[4]이나 축 2개의 경계가 모호하여 직교 이방성을 적용하였다.

설계 변수로 선정한 Aluminum과 CFRP의 물성치는 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

유한요소 모델은 파이프는 Shell 요소를 적용하여 Multizone All quad를 사용하였다. 연결 부분은 Solid 요소로 Ls-Dyna 해석 시뮬레이션^[5]에선 Pyramid 요소의 모델을 지원하지 않으므로 Tetrahedrons의 요소를 사용하였다.

충돌해석은 70,544개의 node와 88,594개의 element로 구성하였다. 각각의 속도는 60km/h^[6]로 프레임의 변형량 및 응력^[7]을 파악하였다. Table 3에 해석에 사용된 조건들을 나타내었다. 또한 Fig. 2에 3가지 case의 해석 모델을 나타내었다.

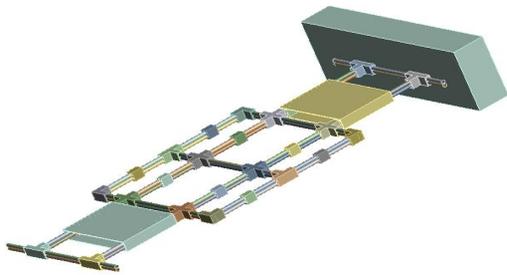
Table 3 Input value for collision analysis

Parameter	Value	
Solver type	Ls-Dyna	
Mesh size	Pipe	10mm
	Connect part	15mm
Boundary condition	Acceleration gravity	9.81 m/s^2
	Fixed support	Collision Wall
Velocity	60km/h	
Material	Aluminum, CFRP	

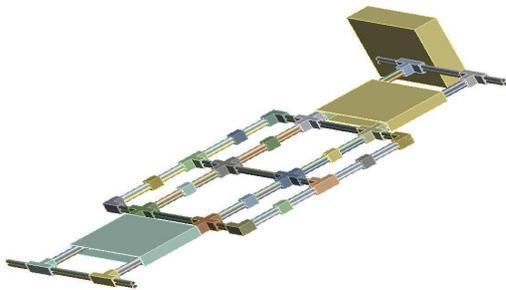
3. 충돌해석

3.1 Aluminum 프레임 해석 결과

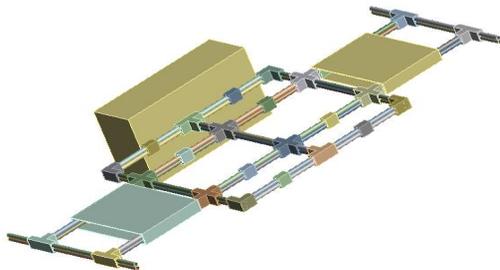
Aluminum 프레임과 CFRP 프레임의 충돌해석은 정면 충돌, 부분 정면 충돌(40%), 측면 충돌 이 3가지 case로 나누었으며 Aluminum 프레임의 충돌은 case 1-1, 1-2, 1-3으로 각각의 충돌 case를 나타내었다. 3개의 case의 속도는 60km/h로 동일하며 충돌 벽은 rigid로 설정, Fixed support하여 프레임의 온전한 충돌을 유도하였다. Aluminum 충돌 해석⁸⁾은 정면충돌 해석 Maximum deformation은 94.135mm이며 Equivalent stress는 1001.3Mpa의 결과 값이 나왔고, 부분 정면충돌 해석은 70.98mm의 Maximum deformation, 1024.6Mpa의 Equivalent stress의 결과 값이 나왔고 측면 충돌 해석은 58.522mm의 Maximum deformation, 1095.2Mpa의 Equivalent stress의 결과 값이 나왔다. Table 4에 case별 결과를 나타내었다. Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 case별 충돌해석의 결과를 나타내었다.



(a) 100% front collision



(b) 40% front collision

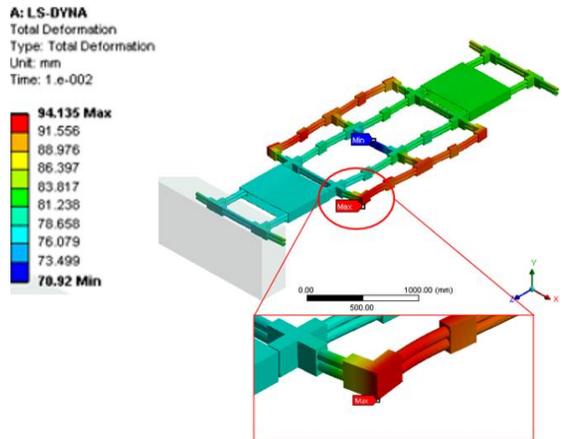


(c) 90 degrees side collision

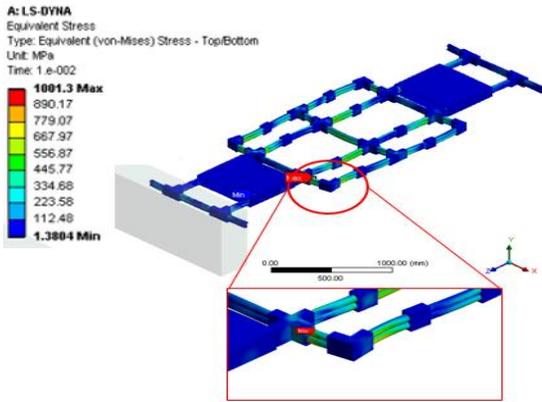
Fig. 2 Collision analysis case

Table 4 Ls-Dyna analysis result for each case

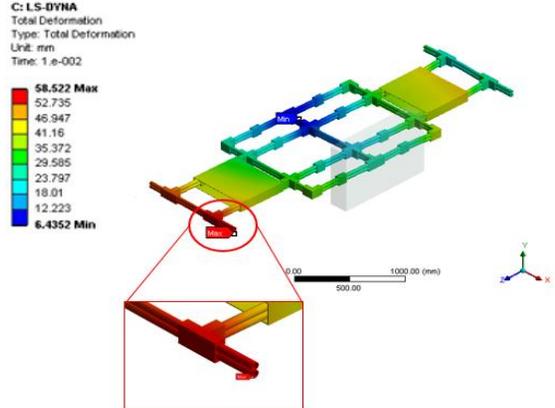
Case no.	1-1	1-2	1-3
Maximum deformation	94.135mm	70.98mm	58.522mm
Equivalent stress	1001.3Mpa	1024.6Mpa	1095.2Mpa



(a) Maximum deformation

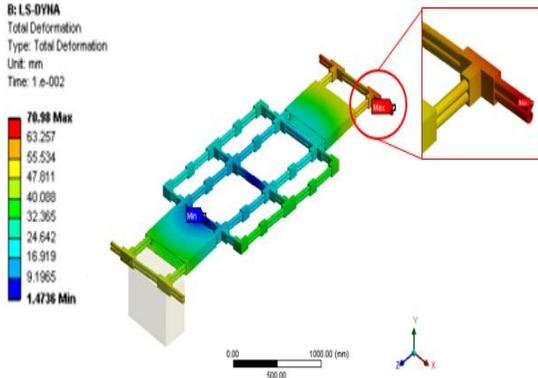


(b) Equivalent stress

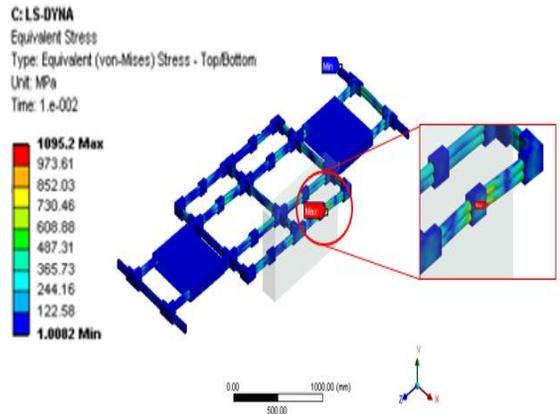


(a) Maximum deformation

Fig. 3 Aluminum frame 100% front collision

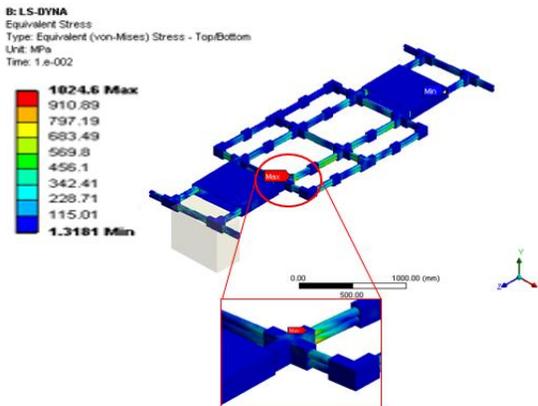


(a) Maximum deformation



(b) Equivalent stress

Fig. 5 Aluminum frame 90 degrees side collision



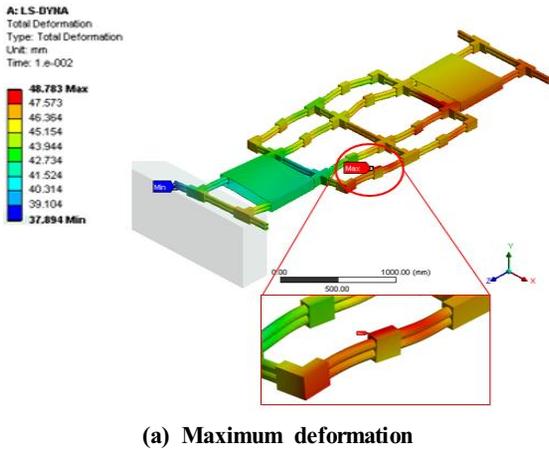
(b) Equivalent stress

Fig. 4 Aluminum frame 40% front collision

Aluminum frame의 해석 결과값에 따르면 정면충돌 시 Maximum deformation이 가장 크며 Equivalent stress가 가장 적었고 측면 충돌시 Maximum deformation이 적으며 Equivalent stress는 가장 컸다. Aluminum frame의 변형량 및 응력은 충돌 시점에서 후방으로 갈수록 값이 작아짐을 확인했으나 부분 정면충돌 시에 최후방에 변형량이 가장 컸다. 배터리는 frame의 중앙 부분에 부착될 것이며 탑승자의 위치를 적용하였을 때 차체 프레임의 응력은 균일하게 분포되어 있어 충돌 에너지를 완화했다고 할 수는 있으나 운전자의 위치에서 최대 응력이 발생하는 case가 있어 설계 개선이 필요하다.

3.2 CFRP 프레임 해석 결과

CFRP 프레임의 충돌은 case 2-1, 2-2, 2-3으로 각각의 충돌 case를 나타내었다. 속도는 60km/h로 동일하며 CFRP의 충돌해석 또한 벽을 rigid로 설정하여 온전한 충돌을 유도하였다. CFRP의 충돌해석 결과로는 정면충돌 시 Maximum deformation은 48.783mm Equivalent stress는 349.69Mpa이며 부분 정면충돌 시 Maximum deformation은 142.65mm이며 Equivalent stress는 865.17Mpa이다. 측면 충돌 시 Maximum deformation은 151.86mm이며 Equivalent stress는 1439.5Mpa의 결과 값이 나왔다. Table 5에 결과 값들을 정리하여 나타내었다. Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에 충돌해석 결과를 나타내었다.



(a) Maximum deformation
(b) Equivalent stress
Fig. 6 CFRP frame 100% front collision

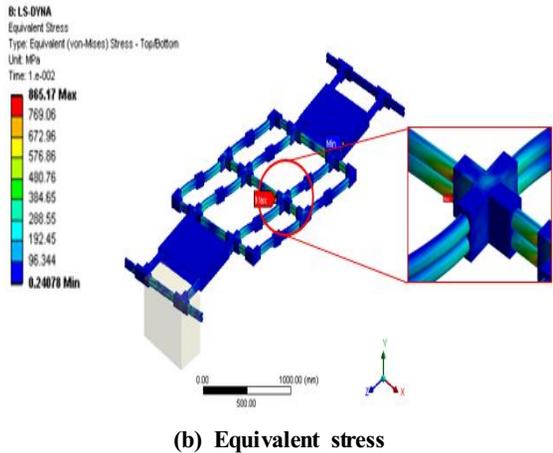
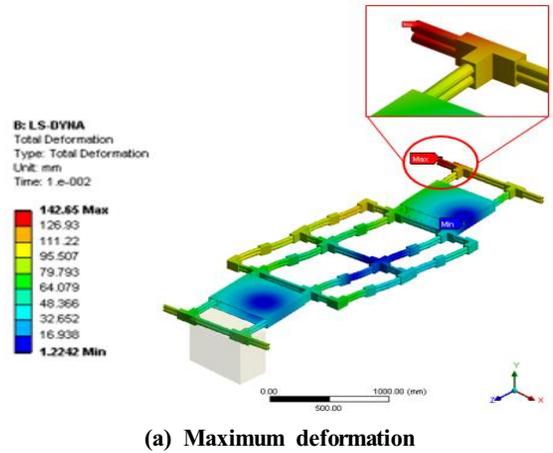
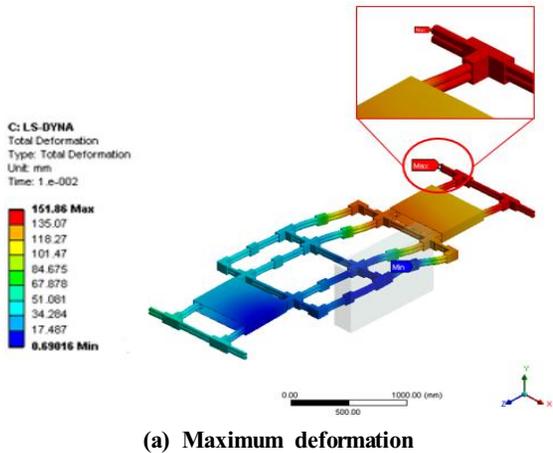
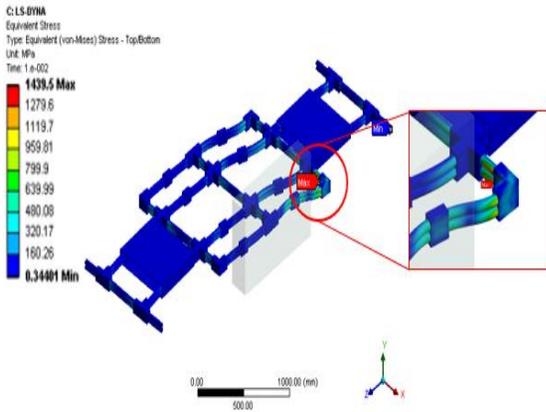


Fig. 7 CFRP 40% front collision





(b) Equivalent stress

Fig. 8 CFRP frame 90 degrees side collision

Table 5 Ls-Dyna analysis result for each case

Case no.	2-1	2-2	2-3
Maximum deformation	48.783mm	142.65mm	151.86mm
Equivalent stress	349.69Mpa	865.17Mpa	1439.5Mpa

CFRP frame의 경우 Maximum deformation은 차체 프레임 주변 부분에 분포되어 있으며 부분 정면충돌을 제외한 충돌 시 Equivalent stress가 충돌 부분 후방으로 갈수록 작아짐을 알 수 있다. 다만 부분 정면충돌 시에는 Equivalent stress가 중앙 부분에 최대로 발생하여 배터리와 탑승자의 위험도가 상승함을 알 수 있다. 또한 충돌이 측면에 가까워질수록 변형량과 응력이 증가하며 이는 CFRP의 이방성으로 인한 결과임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 차체 프레임이 정면, 40% 부분 정면, 측면 충돌 시에 발생하는 변형량과 응력을 Aluminum, CFRP 이 두 개의 소재에 따른 차이를 비교하였다. 본 연구를 통해 확인된 결과를 정리하면 다음과 같다.

CFRP는 Aluminum보다 무게는 가벼우며 강성 및 강도는 더 높다. 그 결과로 CFRP의 정면충돌 및 부분

정면충돌의 결과는 Aluminum보다 Maximum deformation, Equivalent stress의 값이 현격히 낮으며 이방성으로 인한 측면충돌의 높은 Equivalent stress의 값은 높게 나타났다. 이러한 단점을 보완하여 CFRP는 많은 이점을 제공하게 될 가능성이 높다.

Aluminum 및 CFRP 소재에 상관없이 충돌 시 응력이 고루 분포되며 이는 충돌 에너지를 완화시켜 탑승자의 충격을 감소시킨다. 그러나 Aluminum의 경우에는 운전자의 위치에 최대 응력이 발생하는 case가 있으며 CFRP의 경우에는 중앙 부분에 최대 응력이 발생하는 case가 있어 설계개선이 필요하다.

Aluminum의 경우 Maximum deformation 및 Equivalent stress가 CFRP의 경우보다 균일하며 CFRP의 경우 충돌 부분이 측면에 가까워질수록 Maximum deformation 및 Equivalent stress가 증가함을 확인하였으며 이는 CFRP의 이방성 때문임을 알 수 있다.

Aluminum과 CFRP의 소재에 따른 충돌해석 결과를 토대로 CFRP는 Aluminum에 비하여 많은 이점을 제공하나 현재 제조 공정에 Aluminum보다 비용 및 시간을 더욱 투자해야 된다. 이러한 부분을 개선할수록 CFRP는 많은 소재에 대체품이 될 것이다.

후 기

“이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원의 의한 연구임 (‘20005680)’”

REFERENCES

1. Yang, Y. J., Kim, Y. N., Cha, C. S., Jung, J. A. and Yang, I. Y., “Evaluation to Collision Safety Performance of Stacking Angle Different CFRP/Al Circular Member”, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 30, No. 6, pp. 1~6, 2015.
2. Lee, D. H. and Park, J. S., “A Qualitative Method to Find Out the Impact Direction in Traffic Accident”, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 3, pp. 136~140, 2017.
3. Na, H. J., Chun, J. S. and Cho, K. S.,

- “Development of CFRP Tubes for the Light-Weight Propeller Shaft of 4WD Suv Vehicles”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 4, pp. 32~38, 2018.
4. Yeo, I. G., Choi, J. H., Choi, Y. M., Yang, Y. J., Hwang, W. C. and Yang, I. Y., “Impact Characteristics of CFRP Structural Member according to the Variation of Scatcing Condition and Impact Energy”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 22, No. 6, pp. 976~981, 2013.
 5. Kwon, O. H., Baek, S. R., Yoon, J. K. and Lim, J. H., “A Study on Crash Analysis of Vegicle and Guardrail using a LS-DYNA Program”, The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting an Communication, Vol. 16, No. 3, pp. 179~186, 2016.
 6. Sakong, J., Woo, S. C., Kim, J. Y. and Kim, T. W., “Study on Material Fracture and Debris Dispersion Behavior via High Velocity Impact”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 41, No. 11, pp. 1065~1075, 2017.
 7. Han, M. S. and Cho, J. S., “A Safety Study Using Impact and Fatigue Analyses According to Headrest Shape”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 3, pp. 39~44, 2018.
 8. Kim, D. Y., Han, B. S., Hong, M. S., Kim, D. O. and Cheon, S. S., “Low Speed Crash Behaviour of Aluminium Bumper System W.R.T. Design Variables”, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 25, No.1 pp. 11~18, 2017.