

유한요소해석을 통한 탄소섬유-연강 적층판의 저속 충격 해석 모델 개발

박병진* · 이동우* · 송정일*[†]

Development of Low-Velocity Impact Analysis Model of Carbon-Steel Laminates through Finite Element Analysis

Byung-Jin Park*, Dong-Woo Lee*, Jung-Il Song*[†]

ABSTRACT: In this study, finite element analysis of Carbon-Steel Laminates with different layup pattern was conducted to verify similarity to the results of previous studies and to develop the effective model for low-velocity impact analysis. As in the experiment, Finite element analysis of the Fiber metal laminates (FMLs) with five different lamination patterns was carried out, and the impact resistance of the FMLs was confirmed by comparing the energy absorption ratio. The FMLs showed the higher energy absorption ratio than the mild steel having the same thickness, and it was confirmed that all the FMLs had the high energy absorption ratio over than 96%. In addition, the low-velocity impact analysis model proposed in this study can be effectively used to study composite forms and automotive structures.

초 록: 본 연구에서는 적층 패턴이 다른 5가지 섬유금속적층판(Fiber Metal Laminates, FMLs)에 대한 유한요소해석을 수행하여 선행 연구로 수행한 낙추충격시험과의 유사성을 검증하였고, 효과적인 저속 충격 해석 모델을 개발하였다. 또한 동일한 두께를 가지는 연강(mild steel)과 에너지흡수율을 비교하여 Carbon-Steel 섬유금속적층판의 내충격성을 확인하였다. Carbon-Steel 섬유금속적층판은 동일한 두께를 가지는 연강에 비하여 우수한 충격흡수율을 보였으며, 모든 적층 패턴에서 96% 이상의 높은 에너지흡수율을 갖는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제시한 저속 충격 해석 모델은 복합형상 및 자동차 구조체 연구에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

Key Words: 섬유금속적층판(Fiber-metal laminates), 저속충격(Low velocity impact), 낙추충격시험(Drop weight impact test), 유한요소해석(Finite element analysis), 흡수에너지(Absorbed energy)

1. 서 론

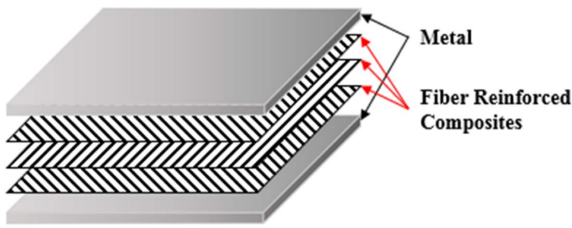
경량화 소재는 항공우주, 자동차 산업과 같은 엔지니어링 응용분야에서 친환경 탄소규제 및 에너지 효율 향상을 위하여 적용되어지고 있다[1,2]. 경량화 소재 중 하나인 섬유금속적층판(Fiber-metal laminates, FMLs)은 Fig. 1과 같이

금속과 섬유강화 복합재료가 교대로 적층된 하이브리드 복합재료이다[3-6]. 섬유금속적층판은 금속과 섬유강화 복합재료의 장점을 동시에 가지고, 우수한 기계적 물성, 내부식성, 내충격성 등의 장점을 가지고 있다. 따라서 Airbus A380의 구조재로 사용되었으며, Boeing 777의 impact bulk Cargo 바닥재로 적용되었다[7,8]. 뿐만 아니라 자동차 산업에서도

Received 26 July 2018, received in revised form 10 September 2018, accepted 19 September 2018

*Department of Mechanical Engineering, Changwon National University

[†]Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Corresponding author (E-mail: jisong@changwon.ac.kr)



(a) Laminate sequence



(b) Experimental setup for dropweight impact test

Fig. 1. Configuration of Fiber-Metal Laminates

기존에는 내장재에만 복합재료를 적용하였지만, 최근에는 복합재료를 범퍼와 임팩트 빔과 같은 차체구조에 사용함으로써 차체 경량화와 내충격성 향상을 동시에 이루기 위한 연구를 진행하고 있다[9,10].

섬유금속적층판은 알루미늄을 기반으로 다양하게 연구되어지고 있으며, Glass, Aramid, Carbon 섬유와 함께 적용되어 활발하게 연구되어지고 있다. 반면, 알루미늄에 비하여 높은 강성과 비용을 가지는 철(Steel)을 기반으로 하는 섬유금속적층판에 관한 연구는 부족한 실정이다[11-14].

선행 연구에서는 Mild Steel sheet, Uni directional Carbon prepreg 및 접착필름을 사용하여 Table 1과 같이 적층패턴이 다른 5가지 Carbon-Steel 섬유금속적층판을 제조하였고, Table 2와 같은 시험 조건으로 낙추충격시험을 진행하여 실험 데이터를 확보하였다[3].

Carbon-Steel 섬유금속적층판의 충격시험 결과, 충격을 받은 평판의 상부에는 균열이 발생하지 않았지만, 하부에는

Table 1. Laminate structure of Carbon-Steel Laminates

Case	Stacking sequence	Thickness
1	Steel/0/0/Steel	2.10
2	Steel/0/90/Steel	2.10
3	Steel/0/90/0/Steel	2.25
4	Steel/90/0/90/Steel	2.25
5	Steel/0/90/90/0/Steel	2.37

Table 2. Conditions of drop-weight impact test

Impactor weight	4.7 kg
Impact speed	4.61266 m/s
Impact energy	50 J

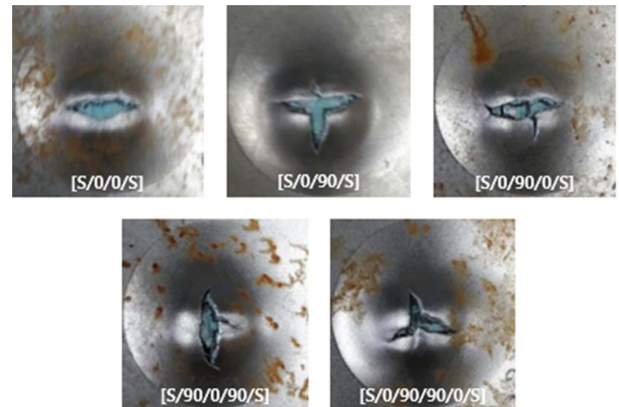


Fig. 2. Crack propagation direction of Carbon-Steel laminates

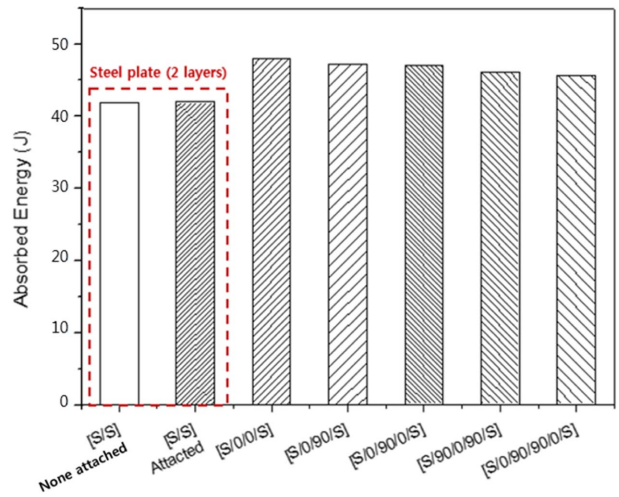


Fig. 3. Absorbed energy comparison of the steel plate and Carbon-Steel laminates

균열이 발생하였다. Fig. 2는 시편의 하부에 발생한 균열의 형상을 나타낸 것이다. 여기서 가로는 0° 방향, 세로는 90° 방향이며, 균열이 섬유의 배열방향을 따라서 진전하는 것을 확인하였다. 하나의 방향으로만 섬유가 배열된 경우에는 균열이 섬유 길이 방향으로만 발생하였으며, 양방향으로 배열된 경우에는 섬유가 많이 배열된 방향으로 균열이 더 쉽게 진전함을 확인할 수 있었다. Fig. 3은 접착 금속판, 비접착 금속판 및 적층 패턴이 다른 5가지 Carbon-Steel 섬유금속적층판의 흡수에너지를 나타낸 것이다. 여기서 금속판은 섬유금속적층판에서 금속판만 있는 경우에 대한 대조군으로써 실험에 사용하였다. 시험결과, 단방향으로 적층된 [S/0/0/S]에서 가장 높은 흡수에너지를 확인할 수 있었고, 적층된 Carbon prepreg의 플라이 수가 증가함에 따라 흡수에너지가 감소하는 경향을 보였지만 차이는 5%이내로 낮게 확인되었다. 또한 Carbon-Steel 섬유금속적층판과 두께가 유사하게 제조된 Mild Steel 시편에 비하여 높은 흡수에너지를 나타냈고, 제조된 5가지 Carbon-Steel 섬유금속

적층판이 Mild Steel에 비하여 내충격성이 우수하다는 것을 확인하였다[3].

본 연구에서는 낙추충격시험을 통한 선행 연구를 바탕으로 5가지의 적층 패턴이 다른 Carbon-Steel 섬유금속적층판에 대한 유한요소해석을 진행하여 저속 충격 해석 모델을 개발하고자 하였다. 또한 Carbon-Steel 섬유금속적층판과 동일한 두께를 가지는 Mild Steel과 에너지 흡수율을 비교하여 Carbon-Steel 섬유금속적층판의 내충격성을 확인하고자 하였다.

2. 해석 방법

2.1 해석 모델

적층 패턴이 다른 5가지 Carbon-Steel 섬유금속적층판의 저속충격모델을 개발하고, Mild Steel과의 에너지흡수율 비교를 통한 내충격성 확인을 위해 ANSYS 18.0 Explicit Dynamic 모듈을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. ASTM D5628 규정에 따른 시편(100 × 100 mm)과 Impactor Tub (D = 12.7 mm)의 실제 크기를 적용하여 모델링하였다. 또한 Carbon-Steel 섬유금속적층판과 Mild Steel 해석에 사용한 물성은 선행 연구에서 재료로 사용된 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer)와 Mild Steel의 기계적 특성평가를 통하여 얻은 물성치를 적용하였다. 섬유강화 복합재료의 실제 파손거동을 모델링 하기 위하여, ANSYS Workbench의 복합재료 해석 모듈인 ANSYS ACP를 사용하였으며, 섬유의 배열방향, 라미나 두께 등 시편의 제조방법과 동일하게 모델링을 수행하였다. ACP를 사용할 경우 섬유의 배열방향에 따른 파손거동을 모사할 수 있으며, 복합재료 파손기준 (Tsai-Wu, Tsai-Hill 등)도 적용이 가능하다. Impactor Tub의

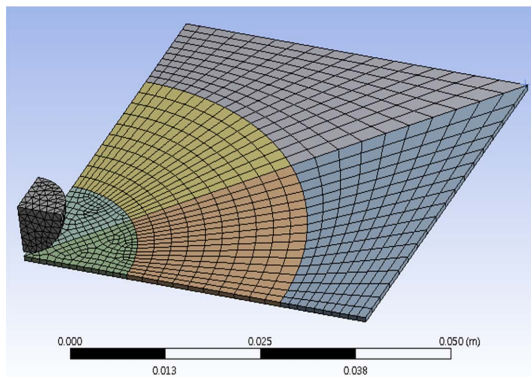


Fig. 4. Applied mesh shape

Table 3. Nodes and elements of each part

Part	Nodes	Elements
Impactor	294	1144
Specimen	959	909

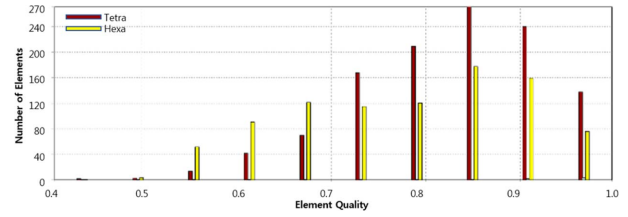


Fig. 5. Element quality analysis

경우는 Solid 요소를 설정하였지만, Carbon-Steel 섬유금속적층판과 Mild Steel 시편의 경우에는 두께를 고려하여 Shell 요소로 설정하여 해석을 진행하였다.

Mesh는 Fig. 4과 같이 Edge Sizing과 Face Sizing을 사용하여 설정하였다. 해석의 정확도를 향상시키기 위하여 메쉬 컨버전스 연구를 수행하였으며, 해석의 정확도에 미치는 영향이 적은 요소망을 Fig. 5와 같이 생성하였다. 적용된 Mesh의 Element Quality는 평균 0.8으로 효과적으로 생성하였다. 시편과 Impactor의 요소와 노드의 수는 Table 3과 같다.

2.2 경계 조건

Fig. 6과 같이 시편에 Fixed support, Displacement 조건을 설정하고, Impactor에 Velocity 조건을 설정하여 경계조건을 선정하였다. Impactor의 Velocity 조건은 선행 연구의 낙추충격시험 조건과 마찬가지로 4.61266 m/s(Impact Energy: 50 J)로 설정하여 수행하였다. 경계조건을 토대로 적층 패턴에 따른 시편의 Plastic Strain과 Directional Deformation을 확인하였다. 또한 Impactor의 Directional Velocity 데이터 결과를 토대로 충격 전과 후의 속도 변화를 확인하고, 방정식 (1)과 (2)에 대입하여 에너지흡수율을 확인하였다.

$$A(t) = K(0) - K(t) = \frac{1}{2} m [V_1^2 - V(t)^2] \quad (1)$$

$$\text{Energy absorption ratio(\%)} = \left[1 - \frac{E(\text{total}) - A(t)}{E(\text{total})} \right] \times 100 \quad (2)$$

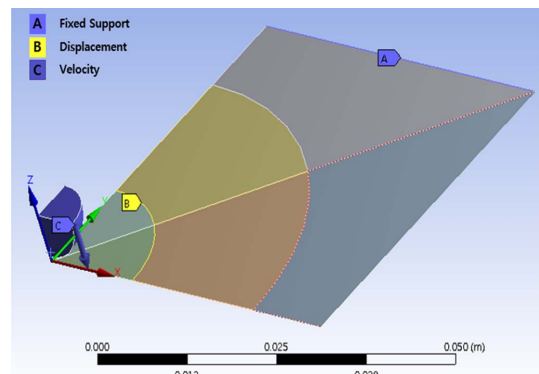


Fig. 6. Boundary conditions of analysis

3. 해석 결과

3.1 적층 구조에 따른 변형

Fig. 7에 유한요소해석을 통한 등가 소성변형 결과를 나타냈고, 0°와 90° 방향의 소성변형 결과를 나타내어 적층 패턴의 영향을 확인하였다.

0°와 90° 방향의 소성변형 결과는 적층된 섬유 비율과 방향에 영향을 받는 것을 확인하였다. 단방향으로 적층된 [S/0/0/S]의 경우, 90° 방향에 비하여 0° 방향의 소성 변형이

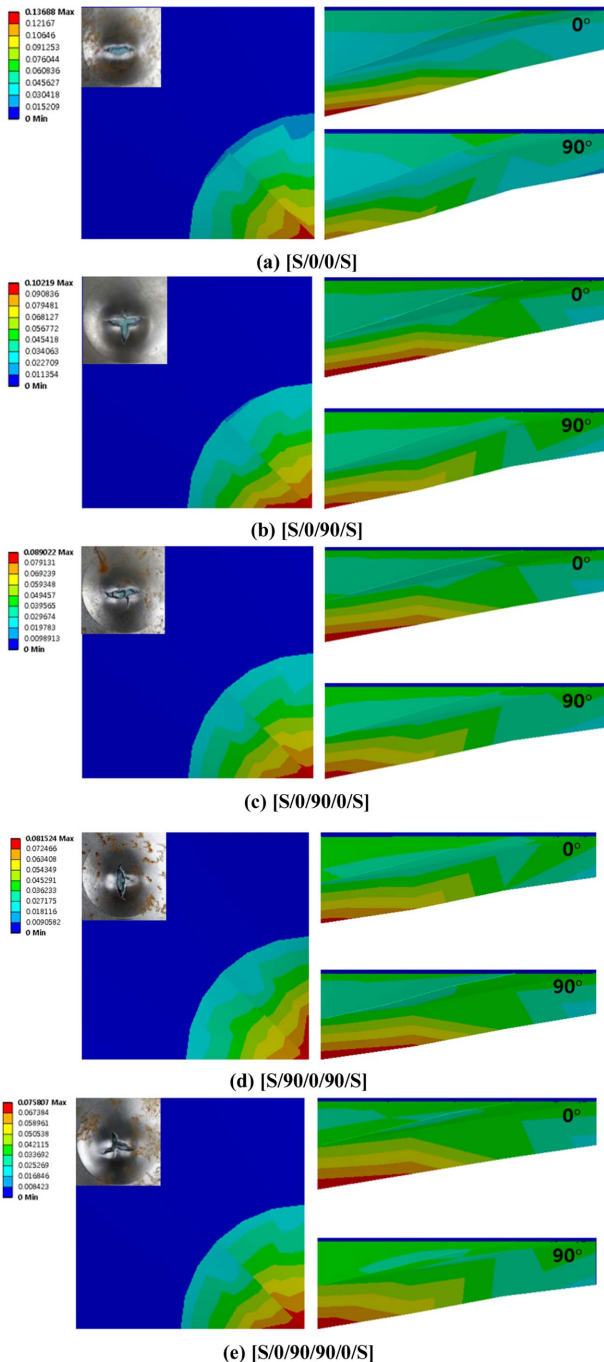


Fig. 7. Equivalent plastic strain results of Carbon-Steel laminates

지배적이다. 하지만 [S/0/90/S]와 [S/0/0/S]의 90° 방향 소성 변형 결과를 비교하였을 때, [S/0/90/S]에서 변형이 큰 것을 확인할 수 있다. 0°와 90° 방향의 섬유 적층 비율이 동일한 경우, 0° 방향으로의 소성변형이 크지만 90° 방향으로 비교적 균등하게 변형이 일어난 것을 확인할 수 있다.

선행 연구에서의 낙추충격시험 결과와 비교하였을 때, 섬유의 배열이 Carbon-Steel 섬유금속적층판의 균열에 영향을 미친다는 결과를 유한요소해석 결과에서도 확인하였고, 적층 패턴에 따른 균열의 거동을 유한요소해석을 통해 예측할 수 있는 모델을 제시하였다.

3.2 에너지흡수율 비교

Carbon-Steel 섬유금속적층판과 동일한 두께를 가지는 Mild Steel의 해석을 통한 충격해석 결과는 Fig. 8과 같으며, Fig.

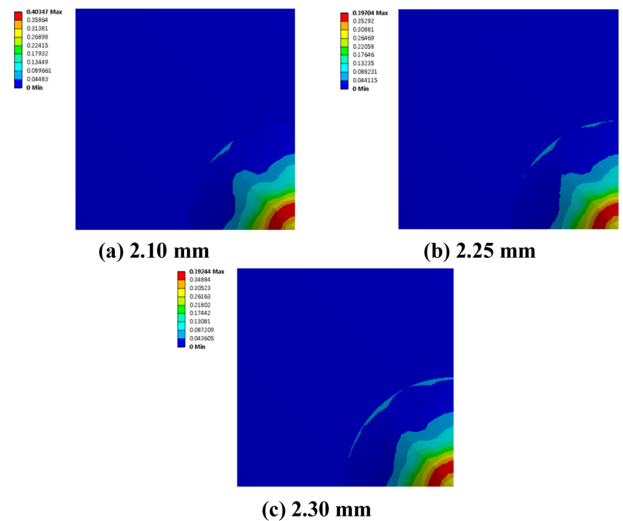


Fig. 8. Equivalent plastic strain results of mild steel at different thickness

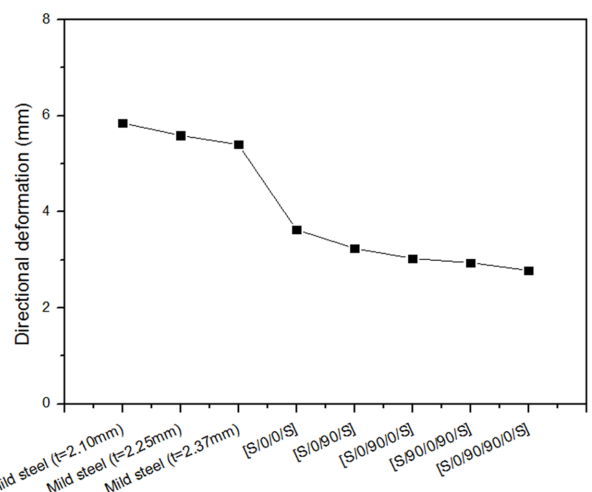


Fig. 9. Directional deformation comparison of mild steel and Carbon-Steel laminates

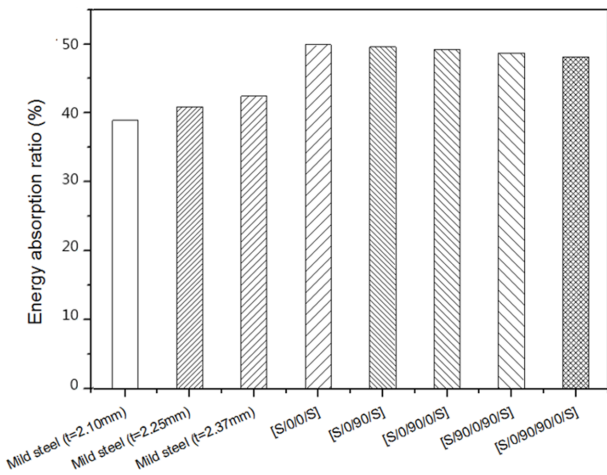


Fig. 10. Energy absorption ratio comparison of mild steel and Carbon-Steel laminates

9에는 Mild Steel과 Carbon-Steel 섬유금속적층판에서 충격을 가하는 수직방향으로 발생하는 최대 변형인 Directional Deformation을 측정 후 그 결과를 비교한 값을 나타내었다. Directional Deformation은 모든 두께의 Mild Steel에서 Carbon-Steel 섬유금속적층판에 비하여 높은 변형이 발생하였으며, 두께가 증가함에 따라 변형량이 감소하는 것을 확인하였다. Fig. 10은 방정식 (1)과 (2)를 사용하여 얻은 에너지흡수율을 비교하여 나타냈다. Carbon-Steel 섬유금속적층판의 에너지흡수율은 [S/0/0/S]에서 99.76%로 가장 높았고, [S/0/90/90/0/S]에서 96.32%로 가장 낮았다. 하지만 모든 Carbon-Steel 섬유금속적층판에서 96% 이상의 높은 에너지 흡수율을 나타냈고, 동일한 두께를 가지는 Mild Steel에 비하여 높은 값을 보였다. 이와 같은 구조해석 결과는 낙추충격시험 결과[3]와 유사한 경향이며, 해석결과가 실험결과와 잘 일치함을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 Carbon-Steel 섬유금속적층판에 대한 효과적인 저속충격 해석 모델을 개발하고, 유한요소해석을 통한 Carbon-Steel 섬유금속적층판의 에너지흡수율과 Mild Steel의 에너지흡수율을 비교하여 Carbon-Steel 섬유금속적층판의 내충격성을 확인하고자 하였다.

유한요소해석 결과를 통하여 Carbon-Steel 섬유금속적층판 변형에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 섬유의 배열방향을 확인할 수 있었다. 또한 선행 연구의 실험 결과와 유사한 저속충격거동을 확인함으로써, 적층 패턴에 따른 Carbon-Steel 섬유금속적층판의 균열 거동을 효과적으로 예측할 수 있는 저속충격 해석 모델임을 확인하였다.

유한요소해석 결과를 토대로 Mild Steel과 Carbon-Steel 섬유금속적층판의 에너지흡수율을 비교하였을 때, 평판의 경

우에는 Carbon-Steel 섬유금속적층판이 동일한 두께를 가지는 Mild Steel에 비하여 높은 에너지흡수율을 가지는 것을 알 수 있다. 적층판 내부의 섬유강화 복합재료의 비율이 증가할수록 증가한 강도로 인하여 균열개시에 필요한 강도가 커지고, 흡수에너지는 더욱 줄어들게 된다. 이러한 거동을 복잡한 구조의 제품에 적용하였을 때 충격시의 균열 진전 방향을 유도할 수 있으며, 적층패턴의 최적설계를 통하여 향상된 내충격성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

Carbon-Steel 섬유금속적층판의 우수한 내충격성과 고강성 및 경량소재라는 장점을 바탕으로 기존의 금속을 대체하고, 엔지니어링 응용분야의 유망한 재료로 판단된다. 또한 본 연구에서 제시한 저속충격 해석 모델은 복합형상 및 자동차 구조체 연구에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030058).

REFERENCES

- Witik, R.A., Payet, J., Michaud, V., Ludwig, C., and Månson, Jae., "Assessing the Life Cycle Costs and Environmental Performance of Lightweight Materials in Automobile Applications," *Composites: Part A*, Vol. 42, No. 11, 2011, pp. 1694-1709.
- Lee, D.W., Oh, J.S., and Song, J.I., "Parametric Study for Hole Machining in Natural Fiber Composites," *Composites Research*, Vol. 30, No. 1, 2017, pp. 64-68.
- Lee, D.W., Park, B.J., Park, S.Y., and Song, J.I., "Fabrication of High-Stiffness Fiber-Metal Laminates and Study of Their Behavior Under Low-Velocity Impact Loadings," *Composite Structures*, Vol. 189, No. 1, 2018, pp. 61-69.
- Mathivanan, P., Balakrishnan, M., and Krishnan, H., "Impact Properties of Aluminium - Glass Fiber Reinforced Plastics Sandwich Panels," *Materials Research*, Vol. 15, No. 3, 2012, pp. 347-354.
- Tamer, S., Egemen, A., Mustafa, O., and Onur, C., "A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods," *Materials and Design*, Vol. 32, 2011, pp. 3671-3685.
- Ercan, S., Benjamin, L., Feridun, D., and Basavaraju, B.R., "Drop-weight Impact of Plain-woven Hybrid Glass-graphite/toughened Epoxy Composites," *Composites: Part A*, Vol. 40, 2009, pp. 1090-1110.
- Edson, C.B., Rogério, A.S., Luiz, I.P., and Mirabel, C.R., "A Review on the Development and Properties of Continuous Fiber/epoxy/aluminum Hybrid Composites for Aircraft Structures," *Materials Research*, Vol. 9, No. 3, 2006, pp. 247-256.
- Vogelgesang, L.B., and Vlot, A., "Development of Fibre Metal

- Laminates for Advanced Aerospace Structures,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, 2000, pp. 1-5.
9. Ki, S.J., Kim, T.U., and Kim, S.H., “The study on Structural Performance of Fiber Metal Laminates,” *Aerospace engineering and technology*, Vol. 13, No. 1, 1997, pp. 20-26.
 10. Yu, G.C., Wu, L.Z., Li, M., and Jian, X., “Low Velocity Impact of Carbon Fiber Aluminum Laminates,” *Composite Structures*, Vol. 119, 2015, pp. 757-766.
 11. Asundi, A., and Choi, A.Y.N., “Fiber Metal Laminates: An Advanced Material for Future Aircraft,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, 1997, pp. 384-394.
 12. Reyes, G.V., and Cantwell, W.J., “The Mechanical Properties of Fibre-metal Laminates Based on Glass Fibre Reinforced Polypropylene,” *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 1085-1094.
 13. Gonzalez, N.G., Flores, E.A., and Carrillo, J.G., “Mechanical Characterization of Fiber Metal Laminate Based on Aramid Fiber Reinforced Polypropylene,” *Composite Structures*, Vol. 172, 2017, pp. 259-266.
 14. Xia, Y., Wang, Y., Zhou, Y., and Jeelani, S., “Effect of Strain Rate on Tensile Behavior of Carbon Fiber Reinforced Aluminum Laminates,” *Materials Letters*, Vol. 61, 2007, pp. 213-215.