

<응용논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.2.137>ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

금속/폴리머 접합강의 충격 특성에 대한 실험적 연구[§]

공경일* · 권오범* · 박형욱*[†]

* 울산과학기술원 기계 및 원자력 공학부

Impact Energy Absorbing Capability of Metal/Polymer Hybrid Sheets

Kyungil Kong^{*}, O Bum Kwon^{*} and Hyung Wook Park^{*†}^{*} Dept. of Mechanical and Nuclear Engineering, Ulsan Nat'l Institute of Science and Technology

(Received July 11, 2016 ; Revised September 21, 2016 ; Accepted October 4, 2016)

Key Words: High Strength Steel Sheet(고장력강판), Polymer(고분자), Equivalent Flexural Rigidity(등가굽힘강성계수)

초록: 최근 자동차 산업에서 경량화이면서 외부 충격에 민감한 시트 프레임은 안전성을 고려하여 꾸준히 연구개발되고 있다. 특히 본 연구에서는 고장력 강판과 폴리머의 이종 소재를 이용한 시트 프레임의 충격 특성에 대해 살펴보았다. 또한, 충격시 변위는 소재에 대해 굽힘 현상을 고려한 등가 굽힘강성식을 도입하여 살펴보았다. 층간 wire-web 구조물의 다양한 형상의 공학 디자인을 통해 충격시 변화가 적은 디자인을 설계하였으며, 육각형의 층간 wire-web 구조물이 외부 충격대비 안전계수가 높음으로 인해 흡수능력이 향상될 것으로 기대하고 있다. 이러한 연구 결과를 토대로 층간 wire-web 구조물의 설계를 통해 레진과의 함침을 높이고 이종 소재로써의 충격민감도에 유리한 제품을 개발할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract: Recently, the reduction of vehicle weight has been increasingly studied, in order to enhance the fuel efficiency of passenger cars. In particular, the seat frame is being studied actively, owing to considerations of driver safety from external impact damage. Therefore, this study focuses on high strength steel sheet (SPFC980)/polymer heterojunction hybrid materials, and their performance in regards to impact energy absorption. The ratio of impact energy absorption was observed to be relatively higher in the SPFC980/polymer hybrid materials under the impact load. This was found by calculating the equivalent flexural rigidity, which is the bending effect, according to the Castigliano theorem. An efficient wire-web structure was investigated through the simulation of different wire-web designs such as triangular, rectangular, octagonal, and hexagonal structures. The hexagonal wire-web structure was shown to have the least impact damage, according to the simulations. This study can be utilized for seat frame design for passengers' safety, owing to efficient impact absorption.

1. 서 론

산업분야 특히 자동차 산업에서는 단일 소재의 차체 부품 개발이보다 다양한 이종간의 금속/폴리머의 이종 접합 혹은 샌드위치 복합소재를 통한 연구 개발이 진행되고 있다. 이는 곧 차량

부품의 경량화가 에너지 절감뿐만 아니라 CO₂ 배출량 감소로 인한 친환경적이면서도 강도와 강성을 향상시키는 기술 개발이 꾸준히 요구되고 있기 때문이다. 또한 자동차의 성능을 향상시키는 이러한 소재의 기술 개발과 함께 장시간 운전하는 운전자의 시트의 경우 운전자의 피로도와 안전을 위해 다양한 기술이 요구되고 있다. 운전자의 시트에 흔히들 사용되는 고장력 강판은 인장강도가 일반강판보다 2배 정도 높아 상용화된 강판의 두께를 줄여서 경량화를 이룰 수 있다. 하지만 외부로부터 오는 충격 및 진동에 취약하기 때문에 반복

[§] 이 논문은 대한기계학회 생산 및 설계공학부 2016년도 춘계학술대회(2016.5.25.-27., 여수히든베이호텔) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, hwpark@unist.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

피로 내구성 시험기를 통해 시트 프레임의 전변형량과 구조적인 안전성을 검토하기도 한다.⁽¹⁻³⁾ 이러한 구조적 안전성을 위해 최적 두께 설계를 위한 고장력 강판의 특성을 살펴보지만 여전히 진동이나 소음을 흡수하는 데에는 미흡한 실정이다. 따라서 샌드위치 구조의 폴리머 층을 접합하여 이러한 문제를 해결하고 있으며, 본 연구에서는 고장력 강판에 폴리머 레진을 이중 접합한 소재의 충격 특성과 이중 소재간의 층간 구조물에 대한 설계에 대해서 고찰해 보았다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 금속/폴리머 이중 접합강은 실제 시트 프레임에 사용되는 고장력 강판의 한 종류인 SPFC980(1.2t)을 사용하였고, 폴리머는 폴리우레탄을 갖고 경화제 배합을 통해 이액형으로 사용하였다. 또한 wire-web을 중간에 적층함으로써 wire-web이 구조적으로 충격 흡수능에 미치는 영향을 살펴 보았다. 충격 흡수능에 대한 실험은 Drop weight impact tester (CEAST 9350) 장비를 사용하였고, 이에 따른 시험규격 제원은 ASTM D5628 method FE를 기준으로 실시하였다. Fig. 1에서 충격

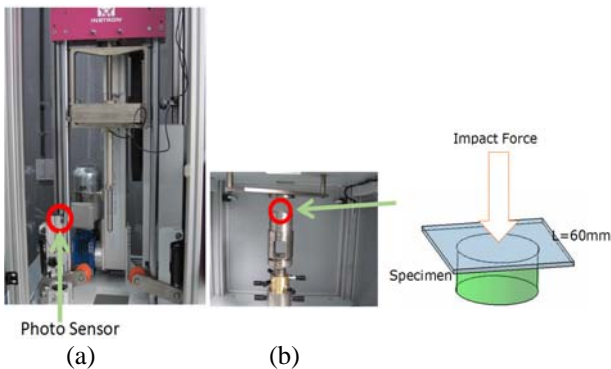


Fig. 1 Schematic configuration of impact test; (a) upper part to collect impact energy data via photo sensor, and (b) lower part to penetrate a specimen of drop-down impact tester

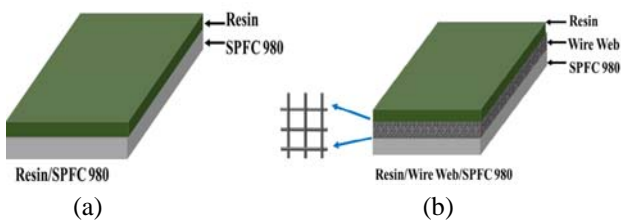


Fig. 2 Schematic configuration of specimen; (a) hetero-junction sample of Resin/SPFC980, (b) hetero-junction sample of Resin/Wire-web/ SPFC980

시험에 사용한 실제 사용한 장비와 제원에 대해서 개략적으로 도식화하였으며, Fig. 2에서는 실험에 사용된 시편의 형태를 도식적으로 나타내었다. 특히 중간 접합에 대한 다양한 wire-web구조물에 대한 설계 해석은 다음 장에서 고찰하였다.

3. 실험 결과 및 분석

Resin의 성분 분석을 위해 Scanning Electron Microscopy (Model: SEM 230) 분석 장비를 사용하였다. 시편표면에 주사된 2차 전자를 통해 시편과 전자빔의 상호작용으로 생기는 신호를 바탕으로 시료의 표면 조성 성분 비율을 구하여 Fig. 3에 도식화하였다. 주요 성분으로 탄소와 철분의 성분

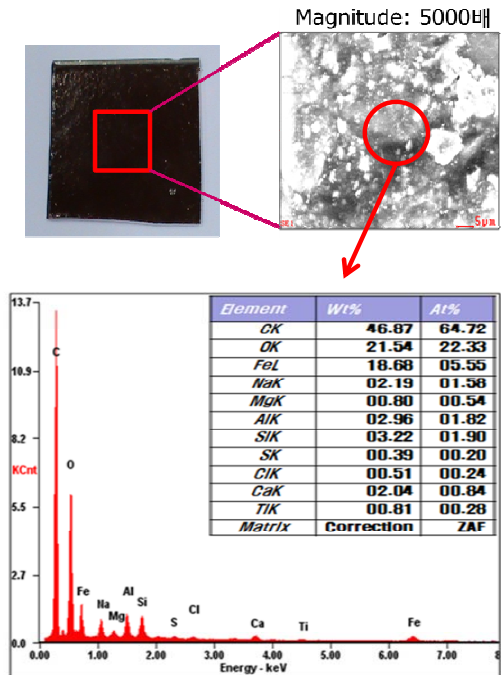


Fig. 3 Analysis of resin composition via energy dispersive spectroscopy

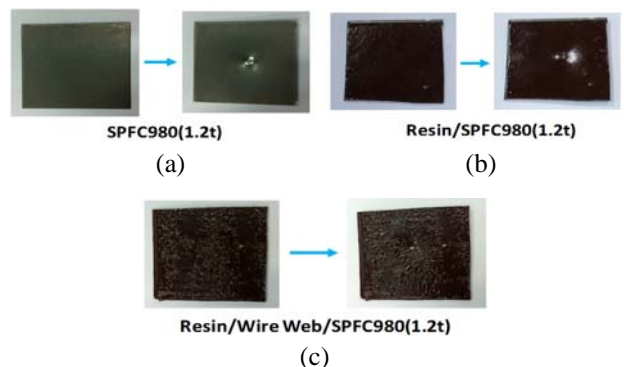


Fig. 4 Impact variation of specimens

함량이 비교적 높게 나옴을 확인하였다. 이로써, 폴리머의 사용은 이에 준하는 성분들의 조성을 배합하여 설계 사양에 고려해 볼 수 있다. Fig. 4에서는 실험에 쓰인 각 샘플의 충격 변화를 살펴보았다. 특히, wire-web의 층간 구조 접합강에서는 충격 흡수가 강판에 이르기 전에 폴리머에 상당부분 이뤄짐에 따라 동일한 외부 충격임에도 변위 차이가 작음을 확인할 수 있었다.

외부 충격에서의 변위 차이가 작은 이유는 외부 충격 하중이 샘플에 분산되는 차이에서 비롯되며, 충격시 레진의 흡수 정도뿐만 아니라 층간 wire-web의 구조적인 형상이 가져다 주는 효과가 있기 때문이다. 이로 인해 이중 소재이므로 두께가 높아진 경향이 있음에도 불구하고, 고장력강판만으로는 충격이나 진동에 취약한 점이 다소 있기에 이중 소재로의 전환을 고려해 볼 수 있다.

Fig. 5에서는 충격 흡수에 대한 그래프를 SPFC980(1.2t) 단일 소재 시편 3개를 통해 살펴 보았다. 충격 시험에서 사용되는 에너지는 Drop weight이 갖는 초기 위치에너지가 시편에 맞고 복원되었을 때 잃은 에너지와 시편에 보존된 에너지의 합으로 표현된다. 일반적으로 low velocity impact에 따른 에너지 상관식은 아래와 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$E_{total} = E_{rebound} + E_{absorbed} \quad (1)$$

수식 (1)과 Fig. 5의 실험 데이터에서 알 수 있듯이, 충격시 에너지는 연성 재료의 거동이 있음을 확인하였다. 또한, Fig. 5에서 충격 테스트 결과 SPFC980 단일 소재의 힘-변위는 각각 $4.53 \pm 0.01\%$ ms에서 높은 경향이 있음을 알 수 있었으며, SPFC980 소재가 흡수한 에너지는 10.44 J임을 확인하였다. Fig. 5에서 Peak point는 낙하 하중의 초기 위치에너지가 샘플에 에너지 소진이 이뤄진 지

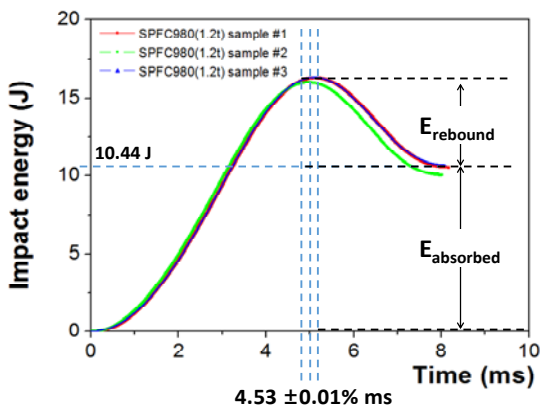
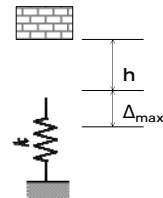


Fig. 5 Total impact energy absorption of SPFC980

점을 의미하며, 속도가 0인 지점이다. 이후 impact striker시스템에 소실된 에너지와 시편에 흡수한 에너지로 진행됨을 확인하였다.

이외의 소재(Resin+SPFC980, Resin+Wire web+SPFC980)들에 대해서도 resin이 주는 효과와 wire-web이 주는 효과를 알아보기 위해 각각 충격 낙하 실험을 하였으며, 실험에 쓰이는 샘플은 소재당 각각 3개의 시편을 가지고 진행하였다. Fig. 6에서는 소재가 받는 충격 에너지 값을 그래프로 보여준다. 또한, 충격 하중에 따른 정적 변형량은 시스템이 받는 힘-변위 관계식에서 에너지 보존에 의해 식 (2)와 같이 구할 수 있다.



$$U_{potential} = U_{kinetic}$$

$$W(h + \Delta_{max}) = \frac{1}{2}(k\Delta_{max})\Delta_{max}$$

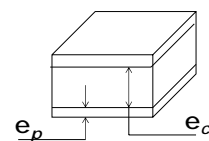
$$W(h + \Delta_{max}) = \frac{1}{2}k\Delta_{max}^2$$

$$\Delta_{max}^2 - \frac{2W}{k}\Delta_{max} - 2\left(\frac{W}{k}\right)h = 0$$

$$\Delta_{max} = \Delta_{st} \left[1 + \sqrt{1 + 2\left(\frac{h}{\Delta_{st}}\right)} \right], \quad \Delta_{st} = \frac{W}{k} \quad (2)$$

$U_{potential}$: 위치에너지, $U_{kinetic}$: 운동에너지,
 W : 하중, h : 초기위치, Δ_{max} : 최대변위,
 Δ_{st} : 정적 처짐 변위, k : 탄성계수

본 실험에 쓰인 SPFC980/polymer hybrid 소재는 충격하중에 따른 등가 스프링으로 가정할 수 있다. 또한, Δ_{st} 의 계산은 에너지 계산법 즉, 그 중에서 단위 하중 방법(unit load method)를 적용하여 Castigliano theorem의 굽힘 효과를 고려하여 아래와 같이 표현할 수 있다. 즉, SPFC980/polymer hybrid소재의 특성상 등가 굽힘 강성($\langle EI \rangle$)을 고려하여, 단순 보로 단순화한 식 (3)으로 정리할 수 있다.



$$\Delta_{st} \approx \frac{PL^3}{48 \langle EI \rangle} = \frac{P}{k} \quad (static)$$

$$\langle EI \rangle \approx E_p e_p \frac{(e_c + e_p)^2}{2} \quad (3)$$

- $\langle EI \rangle$ = equivalent flexural rigidity; contribution from bending effect
- E_p = Modulus of elasticity of the material of the facings
- e_p = thickness of the skin material with strong mechanical properties
- e_c = thickness of the core material with weak mechanical properties

따라서, 충격 하중에 의한 최대 변위는 등가 굽힘 강성 $\langle EI \rangle$ 과 낙하 위치의 상관식으로 구하였다. Impact factor(n)는 Δ_{max} 와 Δ_{st} 의 상관관계에서 구할 수 있으며, 아래와 같이 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Impact factor} = n = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{st}} = 1 + \sqrt{1 + 2 \left(\frac{h}{\Delta_{st}} \right)}$$

$$\Delta_{max} = n \times \Delta_{st} \quad (4)$$

이를 바탕으로 충격 낙하 실험에서의 최대 변위의 결과 값은 Fig. 6에 나타내었다. Resin의 두께가 증가할수록 앞서 이론 식에서 구한 값들과 실험으로 측정된 변위값들에서의 유사한 경향을 확인할 수 있었다. 또한 이론 식에서 구한 결과 값이 다소 높게 나온 경향이 있지만, 이는 선형탄성재료 거동으로 가정하였고, 또한 이종 소재의 복합재료가 단순 보로 표현한 등가 굽힘계수 $\langle EI \rangle$ 의 영향이 있기 때문이다.

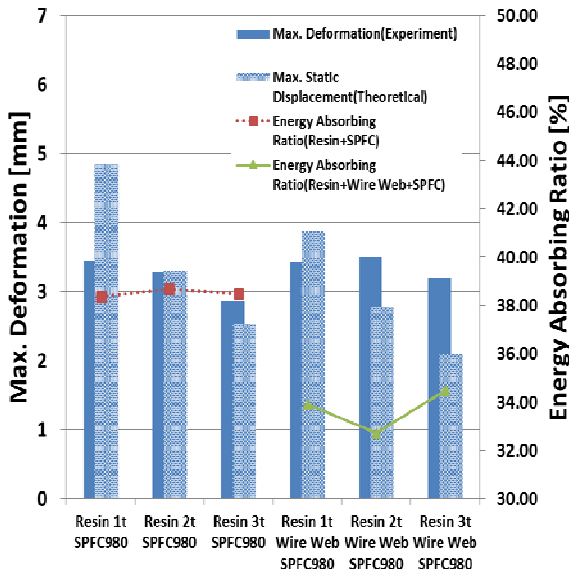


Fig. 6 Energy absorbing ratio and maximum deformation after impact on metal/polymer materials

아래 Table 1에서는 충격 테스트 실험 결과를 정량적인 값으로 정리하였다.

시편에 사용된 층간 wire-web 구조물에 의해 충격흡수 성능이 달라질 것이기 때문에 Fig. 7에서와 같이 삼각, 사각, 오각, 육각형의 디자인을 적용하여 해석해 보았다. 사용한 해석프로그램은 상용프로그램인 Ansys Mechanical APDL 15.0 version을 사용하였고, 경계조건은 실험조건과 같은 상단 부에 외부 하중을 인가하고, 아래단면에는 고정단으로 절점들을 묶어서 표현하였다. 층간의 wire-web구조물에서 물성치는 표준 structural steel 강판으로 Ansys 재료 물성데이터에서 가져와 사용하였다. 또한 하중조건은 시편 사이즈와 외부 하중

Table 1 Maximum deformation, absorbed energy, and absorbed energy ratio for various samples

Specimen	Resin (1t)/SPFC980	Resin (2t)/SPFC980	Resin (3t)/SPFC980
Max. deformation	3.45 mm	3.29 mm	2.86 mm
Absorbed energy	9.51 J	9.46 J	9.49 J
Absorbed energy ratio	38.37 %	38.69 %	38.5 %
Specimen	Resin (1t)/Wire web/SPFC980	Resin (2t)/Wire web/SPFC980	Resin (3t)/Wire web/SPFC980
Max. deformation	3.43 mm	3.5 mm	3.2 mm
Absorbed energy	10.2 J	10.38 J	10.11 J
Absorbed energy ratio	33.9 %	32.73 %	34.48 %

* 단일 소재 SPFC980 sample: Max.deformation = 3.72 mm, absorbed energy ratio = 32.34%

Table 2 Average deformation and impact energy absorption for each sample group

종류	SPFC980	Resin(1~3t)/SPFC980	Resin(1~3t)/Wire web/SPFC980
평균 변형량 (mm)	3.72	3.2	3.37
평균 변형량 상대 비율	1	0.14	0.10
평균 에너지 흡수율(%)	32.34	38	33
평균 에너지 흡수율 상대 비율	1	1.17	1.02

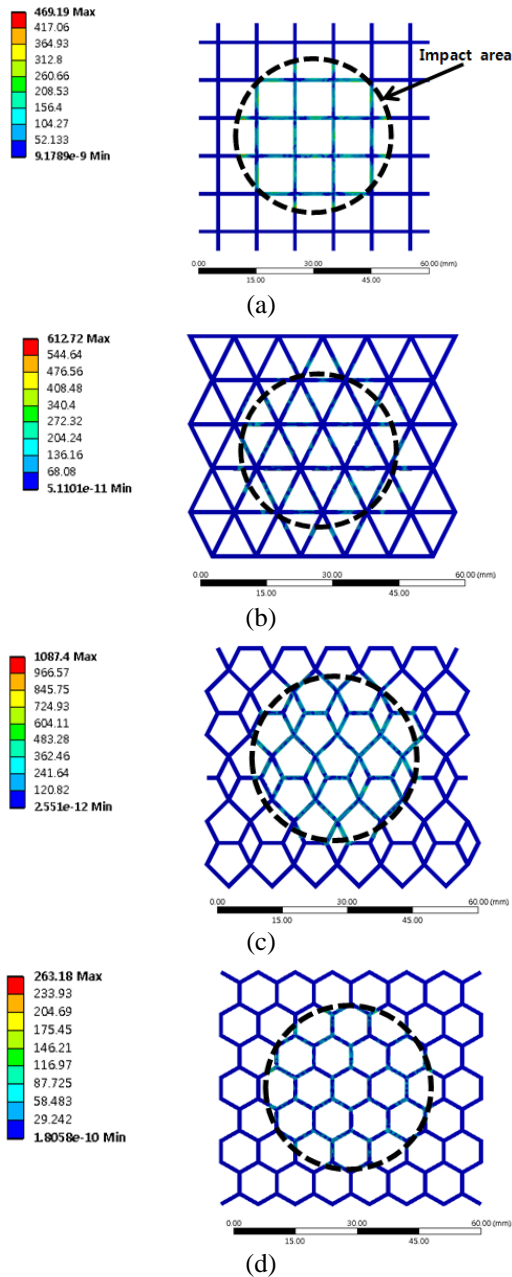


Fig. 7 Von-mises stress of interlaminar structural wire-web after impact (unit: MPa)

이 전달되는 면적을 동일하게 하였고, 두께는 1mm 그리고 외부 인가 하중을 압력(10MPa)으로 구현하여 살펴보았다.

Fig. 7은 실험과 동일한 조건(충격면적, 시편두께)에서 살펴본 등가응력값들을 보여준다. 육각형의 wire-web 구조물이 상대적으로 높은 안전계수가 있음을 살펴 볼 수 있었다. 즉, 재료의 강도에 비해 외부 충격시 반응 응력이 작기 때문에 전체 구조물에서 상대적으로 충격 하중 전달이 높다고 볼 수 있다.

4. 결론

본 실험과 해석으로 살펴본 이종 소재의 고장력 강판과 폴리머 그리고 층간 wire-web의 유무에 따른 연구는 다음과 같이 정리할 수 있다.

Table 2에서와 같이 단일 소재 SPFC980에 비해 전반적으로 wire-web 층간 구조물의 유무가 외부 충격시 평균 변형량이 적음(3.72 mm→3.2 mm→3.37mm)을 알 수 있었고, 평균 변형량 상대비율의 경우 wire-web 층간 구조물의 유무가 단일 소재의 사용보다 상대적으로 10% 이상 보이면서 평균 에너지 흡수율은 1% 이내로 거의 유지됨을 확인하였다. 특히, 단일 소재 SPFC980에 비해 Resin (1~3t) + SPFC980 구조물의 샘플의 경우 충격 에너지 흡수율은 wire-web의 층간 구조적 접합강에 비해 상대적으로 높은 흡수율(38%)을 보였다. 즉, resin(1~3t) + SPFC980 구조물은 충격 에너지 흡수율이 전반적으로 38%인 반면, resin(1~3t) + wire web + SPFC980 구조물의 경우 에너지 흡수율이 33%를 나타내었다. 이는 wire-web 구조물 형상이 충격 댐핑 요소로 충격 흡수능력을 향상시켜줄 것을 기대한 것과는 다른 실험결과이다. 이러한 이유로는, 충격 댐핑 요소를 가미한 wire-web 구조물 형상이 충격 에너지 흡수율에 효과적으로 접합되어 있지 않았거나, resin이 wire-web 구조물 사이 공간에 균일하게 침착되어 있지 않아 층간 부위에서 국부적인 이탈 혹은 변형으로 외부 충격에 의한 충격하중 전달이 미흡하여 충격 흡수가 급격히 떨어졌기 때문으로 판단된다. 이를 통해, wire-web의 구조적 형상보다 resin의 두께를 높이는 것이 충격에 대해 댐핑기능으로 상대적으로 유리할 수 있으나 경량화(레진 1t mm 증가에 따라 0.2% 중량 증가)에는 한계가 있을 수 있다. 실제 시트 프레임 대신 금속/폴리머 이종 접합강을 사용했을 경우 실험적으로는 충격특성이 거의 유지(1% 이내)되는 실험 결과를 확인하였다. 따라서, 효율적인 충격 하중 전달을 위해 wire-web 디자인을 설계하여 해석을 통해 살펴보았으며, 육각형의 층간 설계 구조물이 레진과의 함침을 높이면 이종 소재로써의 충격 특성이 향상되는 제품 개발에 쓰일 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2016년 UNIST(울산과학기술원) 연구비(1.160005.01)와 산업통상자원부의 미래산업선도 기술개발사업인 탄소섬유복합재(CFRP) 가공시스템개발(10053248)사업의 지원으로 수행하였습니다.

참고문헌
(References)

- (1) Kim, K.-S., Cho, H.-S., Kim, Y.-C. and Cho, J.-U., 2014, "Structural Study of Automotive Seat Frame with High Tension Steel Plate Using Analysis and Experiment," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 15, No. 1 pp. 27~31.
- (2) Nam, K. W., Park, S. H., Yoo, J. S. and Lee, S. M., 2012, "Analysis of Impact Characteristics of Bonded Dissimilar Materials for Center Pillar," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 36, No. 8 pp. 929~934.
- (3) Kong, K., Park, H. W. and Seo, J. D., 2012, "Lightweight Material Aluminum Alloy Casting Characteristics with the Center Pillar Application," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, p. 213.
- (4) Kong, K., Deka, B. K., Kwak, S. K., Oh, A., Kim, H., Park, Y.-B. and Park, H. W., 2013, "Processing and Mechanical Characterization of ZnO/Polyester Woven Carbon-Fiber Composites with Different ZnO Concentrations," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 55, pp. 152~160.
- (5) Daniel, G., 2007, *Composite Materials Design and Applications 2nd Edition*, CRC Press, pp. 53~67.