

## 내충격성 향상 및 경량화를 위한 하이브리드 복합재료 스트럿 타워 설계

이현철\* · 오현주\*\* · 김성수\*\*†

### The Design of a Hybrid Composite Strut Tower for Improving Impact Resistance and Light-weight

Hyun Chul Lee\*, Hyun Ju Oh\*\*, Seong Su Kim\*\*†

**ABSTRACT:** Hybrid composite strut tower was designed to prevent permanent deformation of upper mount by the impact from the uneven road. When exceeding energy absorption capacity of tire and suspension systems, residual impact is delivered to upper mount. Especially, in case of using high-rigidity suspension system for high driving performance, the conventional strut tower can be easily deformed due to reduction of energy absorption capacity of suspension systems. In this study, optimal design of hybrid composite strut tower which made of back-up metal and carbon fiber reinforced composite was suggested by using finite element analysis, and low velocity impact test was performed to investigate their dynamic characteristics. Also, 3D measuring and ultra c-scanning methods were carried out to diagnose damages in the strut towers.

**초 록:** 본 연구에서는 자동차가 불규칙한 노면을 주행 시 받게 되는 충격으로 인하여 마운트 상단에 발생하는 영구변형을 방지하고자 하이브리드 복합재료를 사용한 스트럿 타워를 설계하였다. 타이어와 현가장치에서 흡수 가능한 에너지량을 초과하였을 시 잔류 충격은 마운트로 전이되며, 특히 고속주행성능을 향상시키기 위하여 강직한 현가장치를 도입한 경우, 에너지 흡수량 저하로 인하여 기존의 스트럿 타워가 쉽게 변형될 수 있다. 유한요소해석을 통하여 압연강판과 탄소섬유 복합재료로 이루어진 하이브리드 복합재료 스트럿 타워의 최적설계를 진행하였으며, 낙하충격시험을 실시하여 동적 거동을 연구하였다. 또한 3차원 형상측정과 초음파 비파괴 검사방법을 이용하여 스트럿 타워의 손상 유무를 확인하였다.

**Key Words:** 하이브리드 복합재료(hybrid composite), 스트럿 타워(strut tower), 유한요소해석(finite element analysis), 충격시험(low velocity impact test)

## 1. 서 론

탄소섬유 복합재료는 우수한 기계적 성질로 인하여 선박, 항공, 차체와 같은 고성능 제품의 제조에 널리 사용되고 있다[1]. 종래의 금속계 재료에 비하여 높은 비강도, 비강성을 지니는 탄소섬유 복합재료는 경량화 소재로서 주

목 받고 있으며, 특히 자동차 산업에서 날로 증가하는 이산화탄소 배출 규제 및 연료 효율성 증진과 맞물려 경량화를 위한 연구가 그 어느 때보다 활발히 진행되고 있다.

스트럿 타워는 자동차의 현가장치를 지지하는 기능을 수행하는 차체의 한 부분으로써, 주행 시 노면으로 발생하는 충격 하중과 피로하중에 의하여 영구변형이 발생할 수 있

접수: 2013년 5월 10일, 수정: 2013년 8월 16일, 게재승인: 2013년 8월 19일

\*전북대학교 유기소재파이버공학과 대학원

\*\*†전북대학교 유기소재파이버공학과 교수, Corresponding author (E-mail: sskim@jbnu.ac.kr)

\*\*전북대학교 유기소재 파이버 공학과 대학원

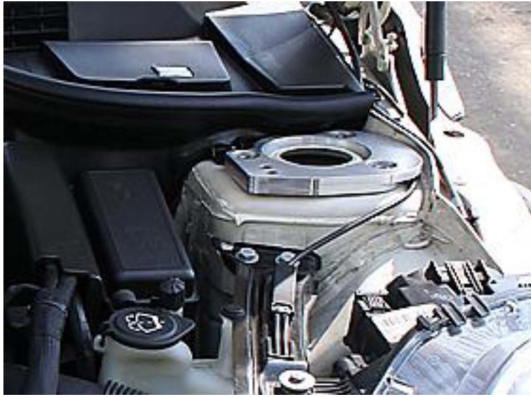


Fig. 1. Strut tower in the automobiles.

다. 스트럿 타워의 주요한 영구변형 인자로서 잔류 충격을 들 수 있는데, 이는 자동차가 불규칙한 노면을 주행 시 발생하게 된다. 스트럿 타워에 전달 된 잔류 충격이 항복강도를 초과하였을 때, 마운트 상단이 위로 볼록 솟아오르는 형태의 영구변형이 발생하게 되며 이를 “머쉬룸(Mushroom)” 현상이라고 지칭한다. 자동차의 충격 흡수량은 현가장치의 특성에 따라 크게 좌우되는데 진동의 감폭이 낮은 경우, 우수한 충격흡수 성능 및 편안한 승차감을 제공하지만 곡선 주행 시 차량의 하중이 상대적으로 크게 이동하여 균형이 깨질 수 있다. 반면 고속주행성능을 향상시키기 위하여 강직한 현가장치를 사용하는 경우, 차량의 하중 이동이 적으며 타이어와 노면의 접지력을 강화할 수 있다. 하지만 상대적으로 충격흡수 능력이 저하되기 때문에 상기와 같은 영구변형의 위험에 대한 노출이 증가하게 되며, 이는 자동차의 조향성능을 저하시키고 더 나아가 안정성 측면에서 문제를 유발할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 부분적 기계적 결합에 의한 강화 마운트 혹은 스트럿 바와 같은 형태의 보강재를 이용한 방법이 시도되고 있으나 응력이 국부적으로 볼트 체결부에 집중되어 낮은 보강 효과를 나타내는 한계점을 지니고 있다.

Colombo[2]는 스트럿 타워에 발생하는 영구 변형 현상을 규명하기 위하여, 저속 운행하는 차량이 불규칙한 노면을 통과 시 스트럿 타워에서 발생하는 가속도 및 변위를 측정하고 유한요소해석을 실시하였다. 저속의 운용 조건에서는 스트럿 타워의 영구변형 현상이 발생하지 않았으나 스트럿 타워에 전달 되는 충격량은 노면, 현가장치의 충격 흡수율, 차량의 속도에 따라 크게 변화하므로 더 가혹한 운용조건에서 스트럿 타워에 전달되는 충격에 대한 연구의 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 차량을 완전 탄성체로 가정하여 보다 가혹한 운용조건에서 스트럿 타워에 발생할 수 있는 충격량을 산출하였으며, 스트럿 타워에서 발생하는 ‘머쉬룸’ 현상을 예방하고 경량화를 달성하기 위하여 유한요소 해석을 통한 탄소섬유 복합재료와 압연강판을 혼용한 하

이브리드 스트럿 타워를 설계하였다. 그리고 이를 검증하기 위하여 낙하 충격시험을 실시하였다. 3차원 형상 측정을 통하여 종래 스트럿 타워의 영구변형의 유무를 판단하였으며, 비파괴검사의 일종인 C-scan 방법을 사용하여 복합재료 내 파단 발생을 판단하였다.

## 2. 하이브리드 스트럿 타워의 설계

### 2.1 종래 강화 마운트의 효율성 분석

기존의 압연강판으로 제작된 스트럿 타워의 머쉬룸 현상을 억제시키기 위하여 강화 마운트나 스트럿 바를 장착시키고 있다. 그러나 스테인레스 스틸 및 알루미늄 합금으로 제작된 기존의 강화 마운트는 강성보강의 효과가 적으며 볼트체결 방식을 취하기 때문에 볼트 주변부에 국부적인 응력집중이 이루어져 변형이 발생되므로 보강효과가 떨어진다. 이를 검증하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/CAE 6.10(SIMULIA, USA) 사용하여 유한요소해석(Finite Elements Analysis)을 진행하였다.

Fig. 2(a)에 보여지는 것 과 같이 순수한 스트럿 타워, 종래 강화 마운트의 기계적 결합과 접착제를 사용한 접합방식, 총 3가지 경우에 대하여 현가장치를 지지하는 스트럿 타워의 하부에 수직하중을 가한 후 응력분포를 살펴보았다. 볼트 체결부 및 접착제를 사용하여 결합된 부분은 완전한 접합이 이루어졌다고 가정되었다. 유한요소해석 결과, 기계적 결합을 사용하였을 경우 수직하중에 의해 발생된 응력 분포가 볼트 체결부에 집중되어 있는 것을 볼 수 있다. 이에 반하여 접착제를 사용한 접합의 경우, 강화 마운트 전반에 걸쳐 고르게 응력분포가 형성됨을 Fig. 2(b)에서

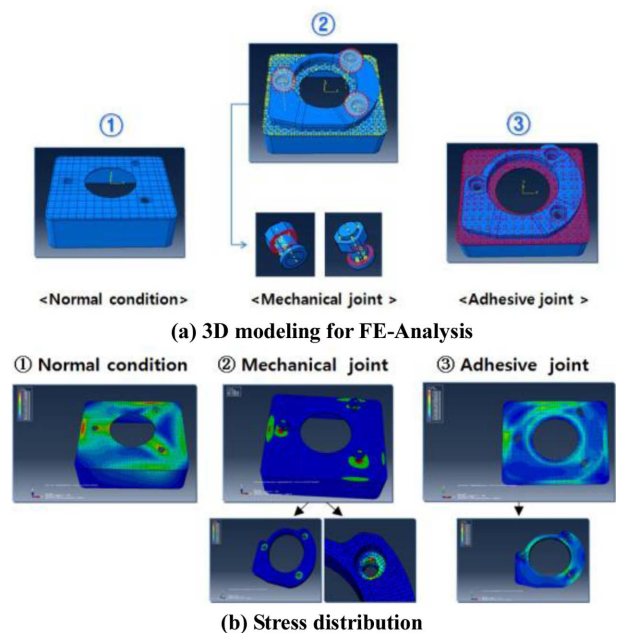


Fig. 2. Results of FE-Analysis for comparison of efficiency.

**Table 1.** Max. stress and Max. displacement

Type	Normal condition	Mechanical joint	Adhesive Joint
Max. stress (MPa)	473	384	70
Max. displacement (mm)	1.57	0.59	0.06

알 수 있다. Table 1은 각 경우에 대하여 스트럿 타워에 발생한 최대응력 및 변위를 나타내었다. 최대 응력 및 변위 모두 접착제를 사용한 접합방식을 취하였을 경우, 기계적 결합방식을 채택하였을 때보다 대하여 각각 82%, 90% 감소하였다. 따라서 기계적 결합을 통한 강화 마운트 보강효과의 효율성은 접착제를 사용한 결합방식에 비하여 현저히 낮음을 확인할 수 있었다.

**2.2 탄소섬유 복합재료의 기계적 물성**

본 연구에서는 하이브리드 스트럿 타워의 설계를 위하여 두 종류의 프리프레그를 사용하였으며 다음과 같다. Carbon/phenolic 8-harness satin weave(Hankuk fiber)는 페놀 모재의 PAN 계열 T300 탄소섬유에 파괴인성을 강화시키기 위한 목적으로 8 wt%의 카본블랙을 첨가한 소재이며, Unidirectional carbon/epoxy는 Pitch 계열의 고강성 탄소섬유와 Bisphenol-A계의 에폭시 모재로 이루어져 있다.

유한요소 해석을 위하여 탄소섬유 복합재료의 기계적 물성은 각각의 ASTM 규격에 준하여 측정되었으며 그 결과는 Table 2에 나타내었다.

**Table 2.** The mechanical properties of the carbon/phenolic and carbon/epoxy composites

Materials		Weft (1)	Warp (2)	Through-thickness (3)
Carbon/phenolic 8-harness satin weave (Hankuk fiber), Material cost: \$104.60	Tensile modulus (GPa)	50.7	73.2	14.3
	Tensile strength (MPa)	433	540	17.2
	Compressive strength (MPa)	221	264	809
	Poisson's ratio	$v_{12}$	$v_{13}$	$v_{23}$
		0.05	0.21	0.2
	Shear modulus (GPa)	$G_{12}$		$G_{13}$
5.77		3.75		
Shear strength (MPa)		75		17.5
Unidirectional carbon/epoxy (SK chemical), Material cost: \$165.20	Tensile modulus (GPa)	Longitudinal		380
		Transverse		5.1
		Shear		5.53
	Tensile strength (MPa)	Longitudinal		1500
		Transverse		65
		Shear		40
Poisson's ratio			0.3	

**2.3 스트럿 타워에서의 충격량 예측**

타이어를 완전탄성체로 가정하였을 경우 불규칙한 노면 주행 시 발생하는 충격량은 차량의 속도변화로 부터 산출할 수 있다. Fig. 3(a)와 같이 1320 kgf 무게의 상용 승용차가 40 km/h 속도로 불규칙한 노면을 통과할 경우, 차체에 발생하는 충격량은 다음과 같다.

$$R\cos\theta + h = R$$

$$\cos\theta = 1 - \frac{h}{R}$$

$$\Delta V = 2V\sin\theta = 2V\sqrt{\frac{h}{R}\left(2 - \frac{h}{R}\right)} = 10.7 \text{ m/s}$$

where,  $R$ : the tire radius

$h$ : the height of the bump or pothole

$l$ : the length of the bump or pothole

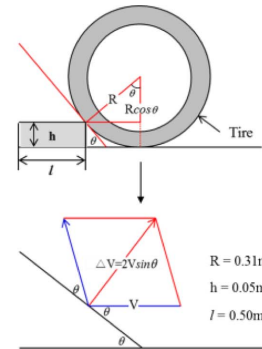
$V$ : the initial velocity

일반적 차량의 경우, 노면으로부터의 발생한 충격량의 70%가 현가장치에 흡수되고 잔류충격이 스트럿 타워에 전달된다고 가정할 수 있다[4,5]. 이 때, 충격시간  $\Delta t$ 는 현가장치의 위상지연에 의하여 결정되며 강한 충격은 고주파 영역에 속하므로 Fig. 3(b)와 유사한 거동을 보이게 된다. 따라서 스트럿 타워에 적용되는 최대하중은 아래와 같다.

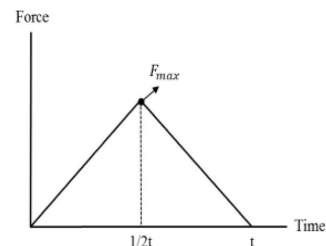
Impulse  $I$

$$= \frac{F_{\max}\Delta t}{2} = \frac{F_{\max} \times 0.025s}{2} = 0.3 \times m\Delta V = 108 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

$$\therefore F_{\max} = 8.64 \text{ kN}$$



(a) The schematic diagram used to calculate the velocity change



(b) The maximum force in the force-time curve

**Fig. 3.** A simple dynamic calculation.

2.4 유한요소 해석

스트럿 타워의 형태는 차량의 종류에 따라 매우 상이하며 압연강판의 두께도 1.2~1.8 mm로써 범위의 폭이 크다. 따라서 다양한 스트럿 타워에 대하여 범용적 유한요소해석 결과를 도출하기 위하여 Fig. 4(a)와 같이 일반화하였다. 스트럿 타워는 외부로부터 하중을 받았을 때 면내 강성에 의존하여 변형이 이루어진다. 따라서 외부의 하중에 의한 하이브리드 스트럿 타워의 변형을 감소시키기 위하여 압연강판의 두께를 0.6 mm로 고정하였으며, 이때 종래의 스트럿 타워에 대하여 30% 경량화를 달성할 수 있는 복합재료 적층각(Stacking sequence)에 대하여 정적 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석의 효율성을 위하여 Fig. 4(b)와 같이 Half-modeling만을 사용하였다. 유한요소해석에서 하중은 스트럿 타워와 현가장치를 연결하기 위하여 체결된 볼트에 가해졌다. 실제 스트럿 타워에 가해지는 하중은 현가장치의 구성에 따라 매우 상이하게 달라지므로 적용되는 하중을 달리하여 반복적 유한요소해석을 실시하였으며, 최종적으로 종래의 압연강판으로 이루어진 스트럿 타워의 항복강도와 같은 응력을 유발하는 하중 0.5 kN을 공

통으로 적용하였다. 유한요소해석에 사용된 요소는 C3D8R이며 요소의 수는 135000개이다.

2.5 최적설계

본 최적설계에 있어 가장 큰 주안점은 탄소섬유 복합재료의 적층각을 달리하여 하이브리드 스트럿 타워의 30% 경량화 달성과 더불어 동일한 충격하중에 대하여 발생하는 응력의 크기와 제조 시 소요되는 탄소섬유 복합재료의 비용을 최소화하는데 있다. 최적설계 방법에 있어 가장 보편적인 방법은 독립변수만으로 이루어진 목적함수를 구성하는데 있다[5]. 그러나 본 연구에서는 두 종류의 탄소섬유 복합재료의 체적 비에 따라 목적함수를 이루는 변수들이 변화하기 때문에, 아래와 같은 최적설계 방식을 도입하였다.

$$\begin{aligned} \text{Stress} &= f(t, \nu) \\ \text{Materials cost} &= g(t, \nu) \\ \text{Minimize } &\Sigma(f(t, \nu) + g(t, \nu)) \\ \text{Subject to } &0 < t < t_{\max}, \quad 0 \leq \nu \leq 1 \end{aligned}$$

where,  $t$ : the total thickness of the composite part  
 $\nu$ : the volume ratio of the carbon/phenolic and carbon/epoxy  
 $t_{\max}$ : the maximum thickness to satisfy the weight reduction constraint

탄소섬유 복합재료의 체적 비에 따라 변화하는 최대 응력 및 재료비용은 다른 단위를 지니므로 가중치를 부과하여 표준화시킬 수 있으며 이에 따른 목적함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Objective function} &= \Sigma(\alpha f(t, \nu)/f_{\max} + (1 - \alpha)g(t, \nu)) \\ 0 < f(t, \nu)/f_{\max} &\leq 1, \quad 0 < g(t, \nu)/g_{\max} \leq 1 \end{aligned}$$

where,  $\alpha$ : the weight factor  
 $f_{\max}$ : the maximum stress under the yield strength of the steel  
 $g_{\max}$ : the maximum materials cost

3. 낙하 충격시험

유한요소해석을 통하여 설계된 하이브리드 스트럿 타워의 검증을 위하여 Fig. 5(a)의 낙하 충격시험기를 사용하여 5 kg 임팩터를 645 mm 높이에서 자유 낙하시켜 스트럿 타워에 충격을 가하였다. 이 때 임팩터의 초기속도와 스트럿 타워에 가해진 하중은 광전센서(E32-T11L and E3X-F21, Omron, Japn)와 힘 변환기(PCB234B, PCB, USA)에 의하여 각각 측정되었으며, 측정은 임팩터가 자유낙하를 시작하는 시작하는 시점부터 임팩터의 움직임이 멈출 때까지 초당 50개의 샘플링 속도로 수행되었다. 동시에 동

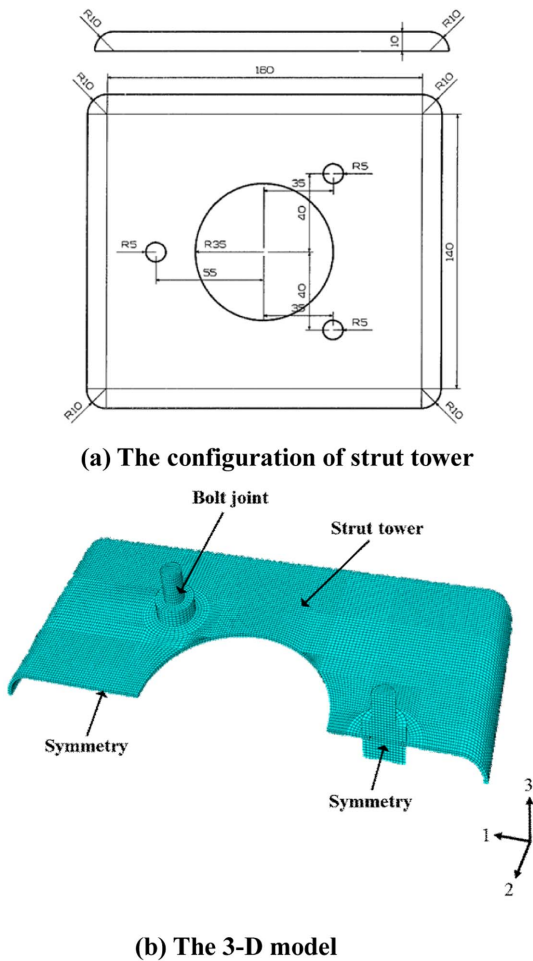
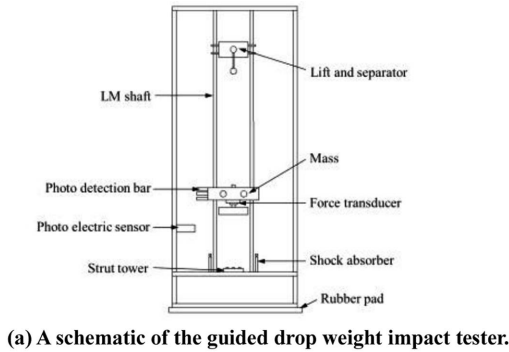


Fig. 4. The commercial strut tower for FE-Analysis.



(a) A schematic of the guided drop weight impact tester.



(b) The composite front plate and the hot-rolled steel back-up plate

Fig. 5. The drop weight impact tester and hybrid strut tower.

일한 하중을 볼트에 가하기 위하여 20 mm 두께의 고강성을 지닌 직사각형의 평판을 임팩터로 사용하였으며 이는 스트럿 타워의 강성 및 두께를 고려하였을 때 강체로 여길 수 있다. 자유 낙하에 의하여 발생된 충격 에너지는 31.64 J 이다.

$$E = mgh$$

where,  $E$ : the impact energy

$m$ : the total mass

$g$ : the acceleration of gravity

$h$ : the drop height

유한요소해석을 통하여 선점된  $[0/90/0/90]_{2s,cp}$ 의 적층구성을 갖는 하이브리드 스트럿 타워와 종래의 압연강판 스트럿 타워에 낙하 충격시험을 실시하였으며 종속시간에 따른 임팩터의 속도변화와 충격에너지는 아래의 식을 통하여 얻을 수 있다.

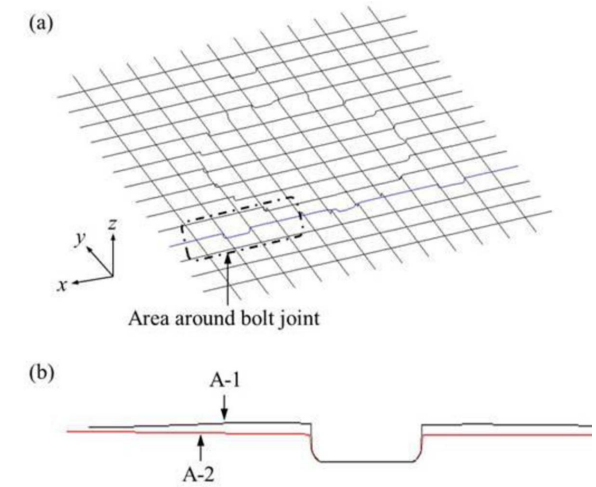


Fig. 6. The 3-D measurement results of the hot-rolled steel strut tower: (a) touch trigger probes pathways, (b) plastic deflection in the area around the bolt joint of the hot-rolled steel strut tower (A-1: after, A-2: before).

$$v(t) = \int_{t_1}^t \frac{F(t)}{m} dt + v_0$$

$$E(t) = \int_{t_1}^t F(t)v(t) dt$$

where,  $F$ : the measured force

$m$ : the mass of the impactor

$v$ : the velocity of the impactor

$E$ : the total energy

압연강판 스트럿 타워의 영구변형의 유무를 판단하기 위하여 3차원 형상측정기(PRISMO7, Carl Zeiss, Germany)를 사용하여 충격 시험 전후를 측정하였으며, Fig. 6(a)와 같이 측정된  $x, y$ 축의 간극은 각각 10 mm이다. 하이브리드 스트럿 타워의 경우, 추가적으로 복합재료 내부에서 발생할 수 있는 박리현상 혹은 섬유 파단현상 발생 유무를 판단하기 위하여 대표적 비파괴검사의 일종인 C-scanning 방법을 활용하였다.

Table 3. Maximum stress and materials cost respect to stacking sequence

Stacking sequence	Thickness (mm)	CP volume (%)	CE volume (%)	Max. stress (MPa)	Cost (\$)
$[(0/90)_{s,cp}/(0/90)_{s,ce}]$	1.6	37.5	62.5	298	15.80
$[0/90/0/90/0/90]_{s,cp}$	1.8	100.0	-	289	11.30
$[0/90/0/90]_{s,ce}$	2.0	-	100	216	21.10
$[(0/90)_{s,cp}/(0/90/0)_{s,ce}]$	2.1	28.6	71.4	202	21.80
$[(0/90/0)_{ce}/(0/90)_{s,cp}/(0/90/0)_{ce}]$	2.1	28.6	71.4	201	21.80
$[(0/90)_{2s,cp}/(0/90/90/0)_{ce}]$	2.2	54.5	45.5	187	19.60
$[(0/90)_{ce}/(0/90)_{2s,cp}/(90/0)_{ce}]$	2.2	54.5	45.5	250	19.60
$[0/90/0/90]_{2s,cp}$	2.4	100	-	195	15.10

4. 결과 및 고찰

유한요소해석 결과 하이브리드 스트럿 타워에서 최대응력은 탄소섬유 복합재료의 적층각 변화에 상관없이 압연강판의 볼트 체결부에서 발생하였으며, Table 3에 각각의 최대응력과 재료비용을 나타내었다. 압연강판에 발생한 최대응력은 탄소섬유 복합재료의 적층강성(Laminate modulus)에 비하여 총 두께에 큰 영향을 받는데 이는 굽힘에 의한 굴곡강성은 두께의 세제곱에 비례하기 때문이다. 반면 Carbon/epoxy 복합재료의 체적비율이 증가함에 따라 재료비용은 크게 증가하는 경향을 보인다.

부과된 가중치의 따른 목적함수의 변화는 Fig. 7에 나타내었다.  $[0/90/0/90]_{2s,cp}$ 는 가중치가 0.3 이상 부여될 때, 가장 낮은 목적함수 값을 보여주고 있으며, 경량화 조건을 만족하는 적층각 중 최대값에 대하여 응력과 재료비용이 각각 34.6%, 37.4% 감소하였다. 가중치가 0.3 이하일 때에는  $[0/90/0/90/0/90]_{s,cp}$ 의 목적함수 값이 가장 낮을 결과를 보여주고 있으며, 이 경우 응력과 재료비용은 3.0%, 53.1% 감소하였다. 따라서 가중치의 범위가 넓고 응력 및 재료비용의 감소효과가 동시에 뛰어난  $[0/90/0/90]_{2s,cp}$ 으로 적층구성된 하이브리드 스트럿 타워를 제작하여 낙하 충격시험을 통하여 종래의 압연강판 스트럿 타워와 비교 분석하였다.

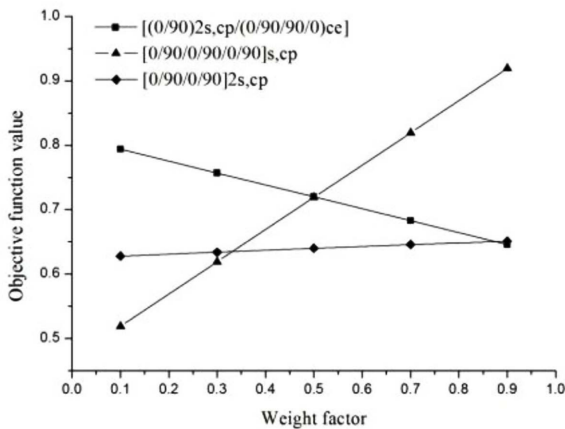


Fig. 7. The objective function values of each stacking sequence with respect to the weight factor.

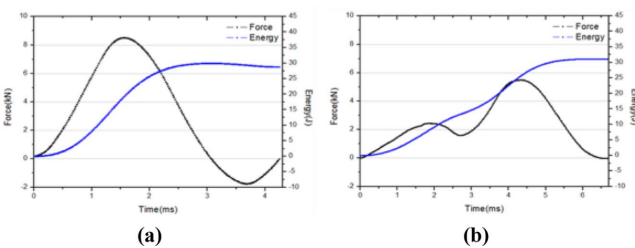


Fig. 8. The force and energy histories of the impact test: (a) the hot-rolled steel strut tower, (b) the hybrid strut tower.

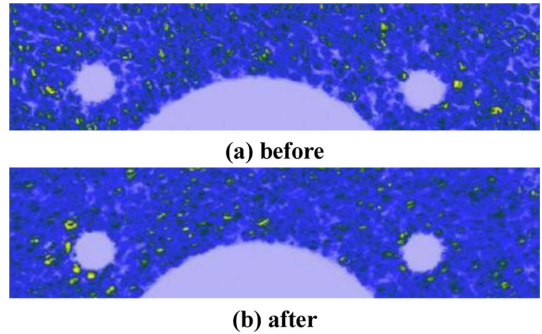


Fig. 9. The ultrasonic C-scan images of the hybrid strut tower manufacture with a stacking sequence of  $[0/90/0/90]_{2s,cp}$ .

낙하 충격시험에서 시간에 따른 충격하중 및 에너지 흡수율은 Fig. 8에 나타내었다. 압연강판 스트럿 타워와 하이브리드 스트럿 타워의 최대 접촉력은 각각 8.51 kN과 5.50 kN이며, 접촉시간은 3.06 ms와 6.52 ms이다.

하이브리드 스트럿 타워의 최대 접촉력은 압연강판 스트럿 타워에 대하여 36% 감소하였으며, 이러한 결과는 접촉시간 크게 증가하였기 때문이다. 3차원 형상측정 결과, Fig. 8(b)에서 낙하 충격시험 후 압연강판 스트럿 타워에 0.6 mm 영구 변형이 발생함을 확인 할 수 있었다. 또 한 상기에서 스트럿 타워의 충격량을 예측한 값 8.64 kN과 최대 접촉력은 매우 유사함을 알 수 있으며, 이는 가혹한 운용조건하에서 스트럿 타워에 ‘머쉬룸’ 현상이 발생 가능함을 나타낸다. Fig. 9은 하이브리드 스트럿 타워의 C-scanning 결과를 보여준다. 충격 전후의 비교를 통하여 탄소섬유 복합재료 내부에 박리 혹은 섬유 파단과 같은 어떠한 손상도 존재하지 않음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

기존의 압연강판으로 제작된 스트럿 타워를 탄소섬유 복합재료를 사용하여 하이브리드 스트럿 타워로 대체하였을 때, 그 결과 및 성과는 다음과 같다.

- (1) 정적 유한요소해석을 통하여 설계된 하이브리드 스트럿 타워의 최적 적층 각도는  $[0/90/0/90]_{2s,cp}$ 이다.
- (2)  $[0/90/0/90]_{2s,cp}$  적층각을 갖는 하이브리드 스트럿 타워는 종래의 압연강판 소재의 스트럿 타워에 비하여 29.2% 경량화를 달성하였다.
- (3) 충격시험 결과, 하이브리드 스트럿 타워에 부과된 동적 하중은 기존의 스트럿 타워에 비하여 54.7% 감소하였다.
- (4) 충격시험에서 기존의 스트럿 타워는 영구변형이 발생한 반면, 하이브리드 스트럿 타워에서는 영구변형 및 복합재료 내부에 파손이 발생하지 않았다.

본 연구를 통하여 하이브리드 스트럿 타워는 기존의 스트럿 타워에 대비하여 우수한 경량화 효과를 지니며, 주행 시 노면으로부터 발생하는 충격에 의하여 발생하는 영구

변형을 예방하기 위한 기능 충분히 발휘할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 자동차부품연구원(KARTECH)가 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Kim, S.S., and Lee, D.G., "Design of the Hybrid Composite Journal Bearing Assembled by Interference Fit," *Journal of Composite Structures*, Vol. 75, 2006, pp. 222-230.
2. Colombo, D., Gobbi, M., Mastinu, G., and Pennati, M., "Analysis of an Unusual McPherson Suspension Failure," *Journal of Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, 2009, pp. 1000-1010.
3. Taylor, D.P., "Energy Management Utilizing the Hydraulic Shock Absorber", Taylor devices, Inc. Technical paper.
4. Duni, E., Monfrino, G., Saponaro, R., Caudano, M., and Urbini, F., "Numerical Simulation of Full Vehicle Dynamic Behavior Based on the Interaction Between Abaqus/Standard and Explicit Codes," *Abaqus Users'Conference*, 2003.
5. Arora, J.S., *Introduction to Optimum Design*, New McGraw-Hill Pub.Co., New York, USA, 1994.