

## Composite material application and shape optimization design of electric mobility steering knuckles

Joon Hwang<sup>†</sup>, Hyun Yong and Seung-Woo Ra<sup>\*</sup>

*Department of Aeronautical and Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea*

*\*Department of Secondary Battery Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea*

(Received December 12, 2025)

(Revised December 15, 2025)

(Accepted December 15, 2025)

**Abstract** This study aimed to reduce the weight and improve the performance of an electric vehicle (EV) front axle knuckle by utilizing topology optimization using CFRP materials. Aluminum alloy-based steering knuckles are currently used in major vehicle models production. To further improve the energy efficiency and maneuverability of electric vehicles and reduce unsprung mass, CFRP composites material change and finite element analysis and topology optimization technology were applied to predict weight loss and performance of the front steering knuckle carriers. Through the application of composite materials and the optimal design, we achieved a weight reduction of about 50.7% compared to the existing aluminum alloy steering knuckle products. From the analysis results under various load conditions (static loading, driving, braking, cornering), it was found that the shape of the CFRP steering knuckle can improve stress distribution and demonstrate excellent safety while maintaining high rigidity and stability. In addition, it is expected that this weight reduction will be applied to contribute to the improvement of vehicle energy efficiency and driving performance. We intend to apply these research results to the industrial field and use them as technical data for the development of new product concepts.

**Key words** Electric vehicle, Steering knuckle, CFRP composite material, Finite element method, Optimal design

## 일렉트릭 모빌리티 스티어링 너클의 복합재료 적용과 형상최적설계

황준<sup>†</sup>, 용현, 이승우<sup>\*</sup>

한국교통대학교 항공·기계설계학과, 충주, 27469

\*한국교통대학교 이차전지공학과, 충주, 27469

(2025년 12월 12일 접수)

(2025년 12월 15일 심사완료)

(2025년 12월 15일 게재확정)

**요약** 본 연구에서는 CFRP(탄소섬유강화플라스틱) 소재를 활용한 위상 최적화를 통해 전기차(EV: Electric Vehicle) 전륜 액슬 너클의 무게를 줄이고 성능을 향상시키는 것을 목표로 최적설계 연구를 수행하였다. 현재 생산되고 있는 주요 차종은 알루미늄 합금소재 기반의 스티어링 너클을 사용하고 있으나, 향후 전기차 전비(EV's Energy Efficiency) 특성을 더욱 향상시키고, 현가하 질량(unsprung mass) 감소를 통한 차량주행성능(vehicle maneuverability performance) 강화를 위해, CFRP 복합소재를 적용하고 유한요소해석(Finite Element Analysis)과 위상최적화(topology optimization)을 적용하여, 전륜 스티어링 너클 캐리어의 경량화와 성능을 예측하였다. 본 연구의 복합재료 적용과 최적설계를 통해 기존 알루미늄 합금 스티어링 너클 제품과 비교하여 약 50.7%의 중량 경량화를 달성했으며, 이를 통해 무게 감소는 차량의 에너지 효율 및 주행 성능 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 다양한 하중 조건(정하중, 가속, 감속, 선회)에서 유한요소해석을 수행한 결과, CFRP 스티어링 너클은 높은 강성과 안정성을 유지하는 동시에 우수한 응력 분포 개선과 안전율을 가질 수 있도록 형상 최적화를 수행하였다. 향후, 전기차를 비롯한 차량 새시 설계 및 개발에서 요구되는 기술수준 제고에 기여하고자 하며, 연구 결과를 현업에 적용하여 신개념 제품 개발을 위한 기술자료로 활용하고자 한다.

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: [jhwang@ut.ac.kr](mailto:jhwang@ut.ac.kr)

## 1. 서 론

자동차 모빌리티 산업은 글로벌 시장의 다양한 소비자의 니즈 수준의 지속적인 상승과 전 세계적으로 탄소중립을 위한 요구조건이 더욱 높아짐에 따라 고성능화와 전기차(EV) 개발을 통한 신규 모빌리티 글로벌 시장확대를 추진중에 있다.

특히, 자동차 경량화를 위한 오랫동안의 연구가 이루어져 왔으나, 최근 전기차의 1회 충전으로 주행할 수 있는 롱레인지 경쟁으로 인해 탑재하게 되는 배터리 모듈의 무게 증가로 인해 정제 중량이 20% 이상 상승할 수 있으며, 또한, 전비 향상을 위한 특단의 차량 바디 및 새시 제작을 위한 소재 선택의 변화와 구조 개선 개발이 시급히 요청되고 있다. 이러한 이유로 경량화 소재인 탄소섬유강화플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic)의 중요성과 자동차 모빌리티 산업에서의 적극 활용이 새롭게 부각되고 있다[1].

전기차의 여러 부품 중 전륜 스티어링 너클은 자동차 조향 장치의 중요한 부품이며, 운전자가 핸들을 돌리면 조향 기어를 통해 힘이 전달되고, 이 운동이 전륜 스티어링 너클 스핀들로 전달되어 좌우의 너클은 타이로드와 연결되어 있어 반대쪽 바퀴까지도 움직임을 전달하게 된다. 따라서 스티어링 너클은 자동차의 구조적 안정성에 있어 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 전기 자동차의 증가하는 차체 무게를 견디기 위해 스티어링너클의 크기와 무게가 증가하고 있으며, 현재는 강도 등의 특성 만족을 위해 주로 탄소강이나 알루미늄 합금을 사용하여 제작되고 있다[2].

Figure 1은 H사의 최고급 전기 자동차에 사용되는 전륜 스티어링 너클이며, 기존에 사용되던 너클과 비교해 무거운 차체를 지탱하기 위해 부품의 면적과 두께가 증

가한 것을 확인할 수 있으며, 기존 차량들과는 다른 형태로 제작된 것을 볼 수 있다. 알루미늄 합금으로 이루어진 너클의 무게를 줄이고 강성을 높이기 위해 많은 연구가 진행되고 있으나, 탄소섬유강화 플라스틱을 이용한 너클 제작에 관한 연구는 아직 부족하며, 명확한 방법 또한 제시되지 않은 상황이다[3].

한국자동차연구원에 따르면, 공차 중량 1,500 kg의 승용차 무게를 10% 줄일 경우 연비는 4~6% 증가한다고 발표했으며, 이는 전기차에도 동일하게 적용된다. 차량 총중량을 줄이기 위해서는 각 부품의 경량화가 필수적이다. 특히 스티어링 너클은 차량당 총 4개가 사용되기 때문에 그 경량화의 효과가 클 것으로 기대되며, 알루미늄 합금에 비해 비중이 약 43% 낮은 탄소섬유 강화플라스틱을 사용하여 너클을 제작할 수 있다면, 차량 총중량은 약 15 kg의 무게를 줄일 수 있을 것이다. 또한, 강성이 더 우수하다는 점을 고려해 새로운 형태로 설계한다면 추가적인 무게 감소도 가능할 것으로 판단된다[4].

본 연구에서는 복잡한 형상에 탄소섬유강화 플라스틱 소재를 적용하지 못한다는 단점을 보완하기 위해서 새로운 형상의 프론트 액슬 너클을 개발하고자 한다. 먼저 상용화 되어 있는 가장 큰 하중을 받는 최신 SUV 전기차의 알루미늄합금 전륜 스티어링 너클을 3D 모델링을 하여 자동차가 받는 하중 조건들 중 정하중 작용 시, 가속 시, 급정거 시, 선회 시를 기준으로 하중조건을 산정하여 유한요소해석을 진행했다. 전륜 너클은 어퍼암, 로어암, 휠 허브로 이루어져 있다. 이러한 필수요소들을 유지하면서 CFRP 소재를 적용해 가장 강성이 높은 형태인 복합적층판 구조로 너클을 재설계한다. 이때 재설계는 위상최적화를 통해 진행되며 CFRP의 공정법을 고려하여 제작이 될 수 있는지 가능성 여부를 판단하며 최적화 방안을 제안하고자 한다.

## 2. 복합재료 물성 모델 정의

CFRP는 높은 비강도와 비강성, 우수한 피로 특성, 그리고 뛰어난 진동 흡수 특성을 가지고 있어 항공기 및 고성능 자동차에 주로 사용된다. CFRP의 기계적 특성은 강도(strength)와 강성(stiffness), 피로 특성(fatigue properties), 등이 있다. 강도와 강성 면에서의 CFRP는 카본 섬유와 매트릭스 재료의 조합을 통해 높은 강도와 강성을 발현한다. 복합재료 적층 판은 여러 개의 단일 재료 층이 서로 다른 방향으로 적층되어 있으며 이러한 적층 구조는 특정 방향에서의 강도와 강성을 최적화 할 수 있게 해준다.

본 연구에서 사용된 탄소섬유는 TORAY사의 T700이며 플라스틱 수지는 RESOTECH사의 Epoxy 1800을 사용을 가정했다. 탄소섬유의 체적비(volume fraction)는



Fig. 1. Front Axle Knuckle (Hyundai Genuine OEM 51710AR500 Front Axle 4WD Knuckle LH for GENESIS GV70 EV 2022~2024).

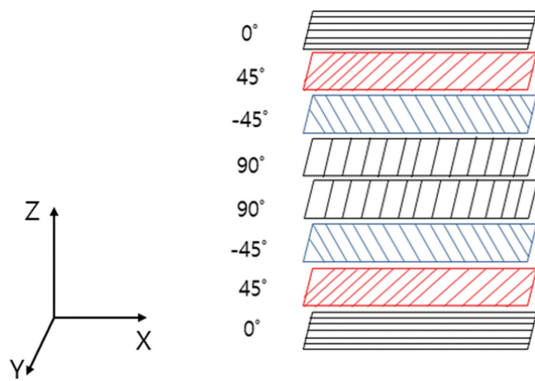


Fig. 2. Composite material with fiber arrangement laminated by angle.

Table 1  
Material properties of uni-directional ply

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E1 (MPa)	E2 (MPa)	G12 (MPa)
1,640	139,290	9,117.4	3,487.4
$\nu_{12}$	$\nu_{23}$	$\nu_{31}$	-
0.286	0.019	0.388	-

0.6으로 지정했으며 CFRP는 기계적 특성이 섬유 길이와 직경방향에 큰 차이를 보이는 이방성을 가진다. Lim 등[5]은 탄소섬유와 에폭시 각각의 물성치를 대상 재료의 비선형거동을 예측하는 모듈인 DIGMAT에 입력하고 모재속에 강화재가 규칙적으로 배열된 것으로 가정하는 Mori-Tanaka 평균장(mean field) 이론을 이용하여 단일 방향 CFRP의 탄성계수, 전단계수와 포이송비를 계산하였으며 이를 Table 1에 나타내었다[6].

본 연구에서는 Table 1의 단일 방향 물성치를 사용하여 Fig. 2와 같이 총 8개의 플라이를 적층한 경우의 물성치를 MATLAB 코드를 통해서 공학적인 상수를 Table 2와 같이 나타내었다. 이때 사용된 플라이의 두께는 20 mm를 맞추기 위해서 각 플라이의 두께는 2.5 mm로 가정하였다. 이차원적으로 계산했기 때문에 코드로 구할

Table 2  
Material properties of the initial laminated CFRP

E <sub>1</sub> (MPa)	E <sub>2</sub> (MPa)	E <sub>3</sub> (MPa)
51,735	51,735	12,008
G <sub>12</sub> (MPa)	G <sub>21</sub> (MPa)	G <sub>31</sub> (MPa)
19,935	4,057.8	4,057.8
$\nu_{12}$	$\nu_{21}$	$\nu_{31}$
0.298	0.298	0.062

수 없는 E<sub>3</sub>, G<sub>21</sub>, G<sub>31</sub>,  $\nu_{31}$ 은 앞에서 언급했던, Lim 등이 인장실험을 통해 얻은 값으로 설정하였다.

### 3. 전기차 전륜 스티어링 너클의 하중 및 경계조건 정의

본 연구에서 사용된 재원은 배터리 탑재로 차량중량이 증가함에 따라 경량화가 요구되고 있는 H사의 Genesis Electrified GV70(Fig. 3)으로 선정하였다. 대상 차량의 전륜 너클은 듀얼링크 맥퍼슨 스트럿 방식으로 독립식 서스펜션이며, 맥퍼슨 스트럿 방식의 전륜 너클은 하중을 받으면 네거티브 캠버가 생기는 더블 위시본에 반해 포지티브 캠버가 생기거나 네거티브 캠버가 생기더라도 그 양이 작아 캠버 게인 특성이 나쁘며 어퍼 위시본이 없어서 튼튼한 댐퍼를 사용하지 않으면 횡력에 약하고 성능이 크게 뛰어나지 않지만 가벼운 서스펜션과 튼튼한 댐퍼를 사용한다면 차체 무게가 가볍고 공간 확보가 용이하다는 특징이 있다.

공차 중량은 2,245 kg이며, 중력 가속도(9.81 m/s<sup>2</sup>)를 받아 차량에 작용하는 총 하중을 다음과 같이 계산하였다. 총 하중은 차량의 네 바퀴에 고르게 분배되며, 연구에서는 차량의 앞쪽 바퀴에 60%의 하중이 작용한다고 가정하였다.

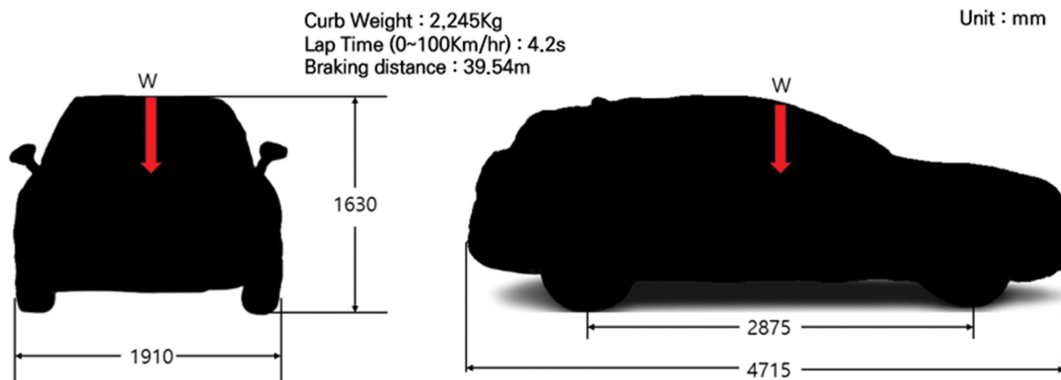


Fig. 3. Genesis electrified GV70 specifications.

$$\begin{aligned}
 F &= m \times g = 2,245 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 22,025.45\text{N} \\
 F_{\text{front}} &= 22,025.45 \times 0.6 = 13,215.27 \\
 F_{\text{knuckle}} &= \frac{13,215.27}{2} = 6,607.64\text{N}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

자동차가 가속할 때 발생하는 하중은 차량의 안정성과 성능에 중요한 영향을 미친다. 특히, 프론트 액슬 너클은 가속 시 차량 무게와 구동력의 분배를 관리하는 중요한 역할을 수행한다. 제로백(0~100 km/h)에 소요되는 시간이 4.2초로 주어졌을 때, 평균 가속도를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{\Delta v}{t} = \frac{27.78 \text{ m/s}}{4.2 \text{ s}} = 6.61 \text{ m/s}^2 \\
 F &= 2,245 \text{ kg} \times 6.61 \text{ m/s}^2 = 14,832.45\text{N} \\
 F_{\text{knuckle}} &= \frac{14,832.47}{2} \times 0.6 = 4,449.73\text{N}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

감속 시 평균 가속도(감속도)는 차량 제동거리를 통해 계산한다. 대상 차량의 제동거리는 39.54 m이며, 차량의 초기속도는 100 km/h(27.78 m/s)에서 정지(0 m/s)까지 감속된다. 감속 시에는 차량의 전체 하중이 앞바퀴에 집중된다고 가정하였다.

$$\begin{aligned}
 v_f^2 &= v_0^2 + 2as = 27.78^2 + 2a \times 39.54 = 0 \\
 a &= \frac{-27.78^2}{2 \times 39.54} = -9.76 \text{ m/s}^2 \\
 F &= m \times a = 2,245 \times 9.76 = 21,913.2\text{N} \\
 F_{\text{knuckle}} &= \frac{21,913.2}{2} = 10,956.6\text{N}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

또한, 10 m 반경은 여러 차량 시뮬레이션에서 서스펜션과 조향 성능을 평가하는 표준화된 조건 중 하나로 널리 사용된다. 이를 통해 다양한 차량 모델에서 유사한

조건을 적용해 비교 분석이 용이해지며, 각 부품이 극한 상황에서도 제 기능을 수행할 수 있는지 검증할 수 있다. 선회 시 차량이 받는 원심력은 다음과 같은 공식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{m \times v^2}{r} \\
 r &= 10 \text{ m}, v = 27.78 \text{ m/s} \\
 F &= \frac{2,245 \times 27.78^2}{10} = 173,227.1\text{N} \\
 F_{\text{knuckle}} &= \frac{173,227.1}{2} \times 0.6 = 51,968.13\text{N}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

#### 4. 위상최적화 알고리즘

최적 설계 과정은 제품이 목표로 하는 성능의 설정, 각종 제약조건의 설정, 성능에 영향을 미치는 설계변수의 설정, 각 설계 변수의 민감도 해석, 그리고 최적의 설계 변수 조합을 찾는 것으로 구성된다(Fig. 4).

위상최적화의 수학적 모델링은 목적 함수와 제약 조건으로 구성된다. 목적함수는 보통 변형률 에너지 최소화, 강성 최대화 등과 관련되며, 제약 조건은 부피 비율, 응력, 변위 제한 등이 포함됩니다. 초기 설계 단계에서 제약조건을 설정하고, 해석도구가 이를 반복 계산하여 최적의 해답을 찾는 과정을 거친다[7]. 밀도 기반 방법(SIMP: Solid Isotropic Material with Penalization)은 설계 공간 내 각 요소의 밀도를 0에서 1 사이의 값으로 정의하여 재료 분포를 최적화하는 기법이다. 밀도가 1에 가까울수록 재료가 배치되고, 0에 가까울수록 제거된다. 이 과정에서 강성 행렬은 밀도에 따라 조정되며, 주어진 제약조건(예: 최대 변형, 강도 요구) 내에서 최적의 재료 배치

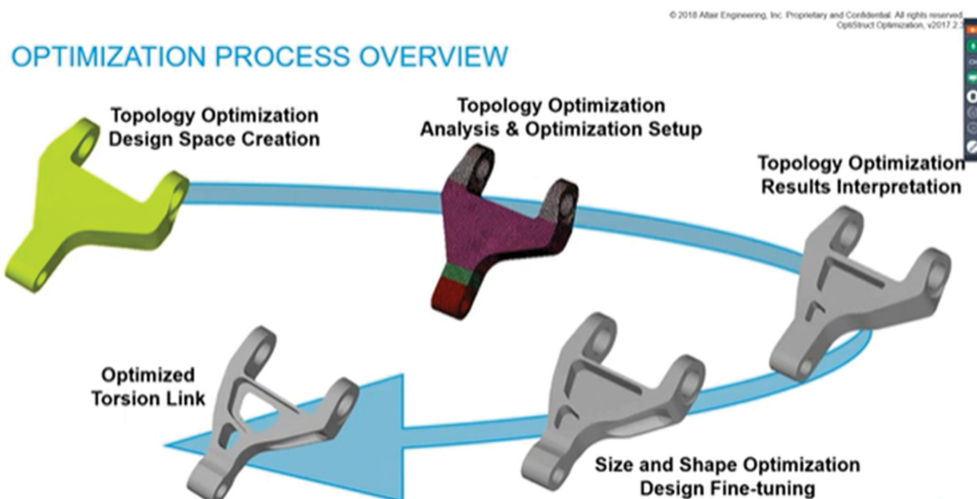


Fig. 4. Topology optimization process example (resource : altair.com).

를 찾는다. 중간 밀도를 억제하기 위해 페널티 값을 적용하여 설계가 단단한 재료와 빈 공간으로 명확히 구분되도록 유도한다.

SIMP 방법에서는 목표함수를 보통 컴플라이언스 (Compliance)로 정하는데, 이는 구조가 주어진 하중에 대해 얼마나 변형되었는지를 나타내며 이를 최소화 하는 것이 목표이다. 식(5)에서 나타낸 것은 목표함수에 관한 식이고,  $C(\rho)$ 는 컴플라이언스를 나타낸다.  $U$ ,  $K(\rho)$ ,  $\rho$ 는 각각의 변위 벡터, 구조물의 전역 강성행렬, 각 요소의 밀도(설계변수)를 나타낸다.

$$C(\rho) = U^T \cdot K(\rho) \cdot U \tag{5}$$

강성행렬은 요소의 밀도에 따라 각 요소에 강성을 결정하는 식으로, 강성행렬은 구조의 변형 해석을 위한 유한요소해석에 사용된다. 여기서  $K_e$ 는 요소  $e$ 의 조정된 강성행렬이고  $p$ 는 페널티 계수,  $K_0$ 는 단단한 재료의 초기 강성행렬을 나타낸다.

$$K_e(\rho_e) = \rho_e^p \cdot K_0 \tag{6}$$

페널티 계수  $p$ 는 중간 밀도를 억제하고 설계가 명확하게 단단한 재료와 빈 공간으로 나뉘도록 유도한다. 일반적으로  $p$ 는 3 정도로 설정한다.

강성행렬로 유한요소 해석을 마친 후에는 최적화의 제약조건을 정하게 된다. 주로 재료 사용량(부피)이나 변위, 응력 등의 제한을 설정한다.  $V_e$ 는 요소  $e$ 의 부피,  $V_0$ 는 주어진 전체 재료의 허용량이다. 최적화 문제를 해결할

때는 목적함수와 제약조건이 동시에 고려된다.

$$\sum \rho_e \cdot V_e \leq V_0 \tag{7}$$

목적함수와 강성행렬, 제약조건을 모두 설정한 후부터 최적화가 진행된다. 이 과정에서 밀도를 업데이트 하는데 이 때 사용되는 방법은 Optimality Criteria(OC)를 사용하고, 반복적으로 각 요소의 밀도를 업데이트하여 최적의 설계로 수렴하는 과정이다.  $\rho_e^{new}$ 는 요소  $e$ 의 새로운 밀도를 뜻하고  $dc_e$ 는 컴플라이언스에 대한 민감도(각 요소의 컴플라이언스 변화율)이다.  $\lambda$ 는 제약조건을 만족하기 위한 변수를 나타낸다.  $move$ 는 밀도의 변화폭을 제한하는 매개변수로 각 요소의 밀도가 지나치게 크게 변화하지 않도록 제어하는 역할을 한다.

$$\rho_e^{new} = \max\left(0.001, \max\left(\rho_e = move, \min\left(1, \min\left(\rho_e + move, \rho_e \cdot \sqrt{\frac{dc_e}{\lambda}}\right)\right)\right)\right) \tag{8}$$

$$dc_e = -p \cdot \rho_e^{p-1} \cdot U_e^T \cdot K_{e0} \cdot U_e \tag{9}$$

### 5. 스티어링 너클의 유한요소해석

Figure 5는 위에서 언급했던 각 부위에 작용하는 X, Y, Z 축의 방향으로 분해된 하중의 벡터 값을 적용한 그림과 경계조건을 설정한 것을 토대로 구현했다. 유한요

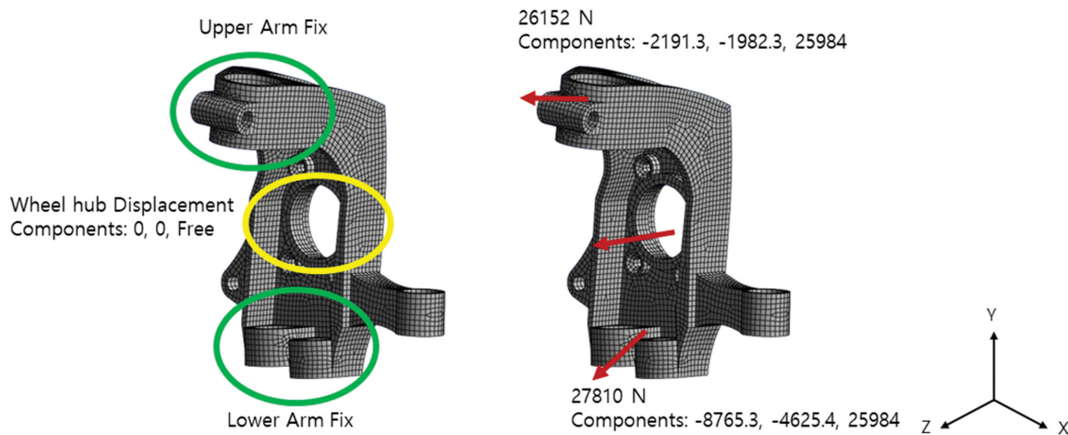


Fig. 5. Boundary and load conditions of front axle knuckle.

Table 3  
Load conditions by front axle knuckle part

Ass'y Part	Load	X-axis Load (N)	Y-axis Load (N)	Z-axis Load (N)
Upper Arm		-2,191.32	-1,982.29	25,984.07
Lower Arm		-8,765.28	-4,625.4	25,984.07
Wheel Hub		-10,957.6	0	51,968.13

Table 4  
Mechanical properties of three different materials

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Young's Modulus E (MPa)	Shear Modulus G (MPa)	Poisson's ratio $\nu$
Steel	7,850	210,000	81,200	0.3
Aluminum	2,700	70,000	26,000	0.33
CFRP	1,640	E1 = 51735	G12 = 19935	0.298
		E2 = 51735	G21 = 4058	0.298
		E3 = 12008	G31 = 4058	0.062

Table 5  
Yield strength and failure strain of three different material

Material	Yield strength (MPa)	Failure strain (%)
Steel	250	10~20
Aluminum	280	12~15
CFRP	400	1.8

소해석 모델의 Node는 87,960개, Elements는 24,838개로 전륜 너클 모델을 정의하였다.

Table 3에는 각 부위에 좌표계별 작용 하중값은 다음과 같다.

또한, 본 연구에서는 기존에 적용하고 있는 스틸 재질, 알루미늄합금 재질과의 중량 비교를 위해 Table 4와 같이 소재 물성을 정리하여 최적설계 해석에 적용하였다.

재료의 파손은 항복강도와 파괴변형률을 통해서 알 수 있고 이는 인장실험 데이터를 기반으로 한다. ASTM 국제 규격과 Toray사에서 제공한 T700 CFRP의 항복강도와

파괴변형률을 가지고 계산한 결과[6,7] Table 5와 같다.

복합응력 상태에서 파손 여부를 예측하는데 사용되며 등가응력(equivalent stress)인 Von Mises stress (식(10))가 가장 많이 사용되며, 이 응력 값은 재료의 항복강도와 비교하여 구조물이 파손 또는 변형될 가능성을 평가한다.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2} + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (10)$$

등가탄성변형률(equivalent elastic strain) (식(11))은 재료의 다양한 변형률 성분을 통합한 값을 의미하며, 특히 복잡한 응력상태에서 사용된다.

$$\epsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]} \quad (11)$$

안전율은 재료의 항복 강도 또는 허용 강도와 구조물

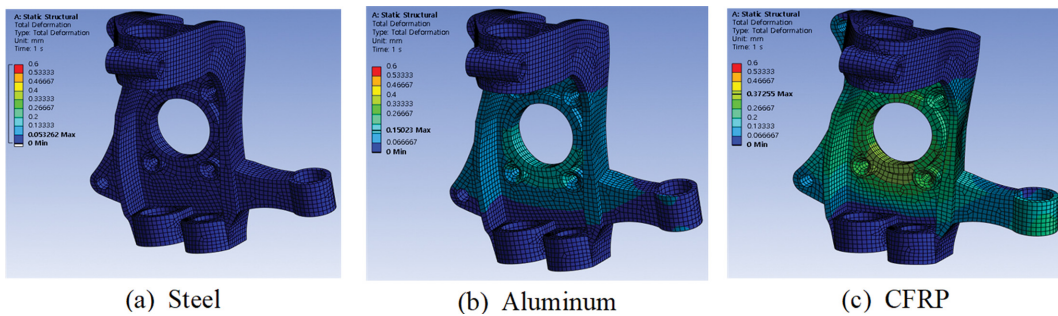


Fig. 6. Comparison of total deformation in front axle knuckles w.r.t. three different materials.

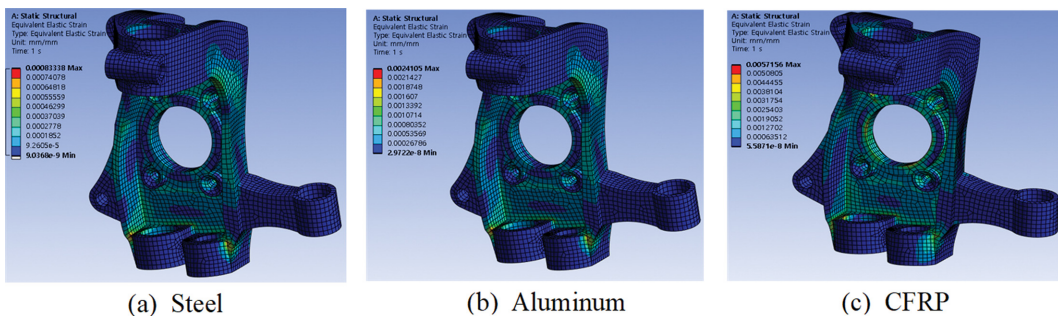


Fig. 7. Comparison of equivalent elastic strain in front axle knuckles w.r.t. three different materials.

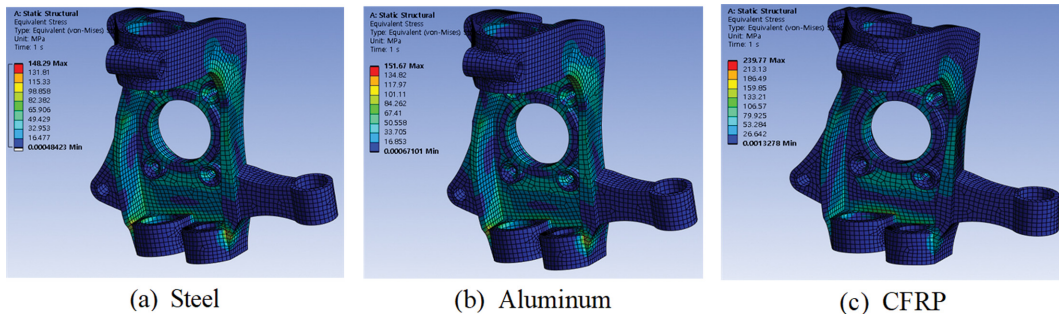


Fig. 8. Comparison of equivalent stress in front axle knuckles w.r.t. three different materials.

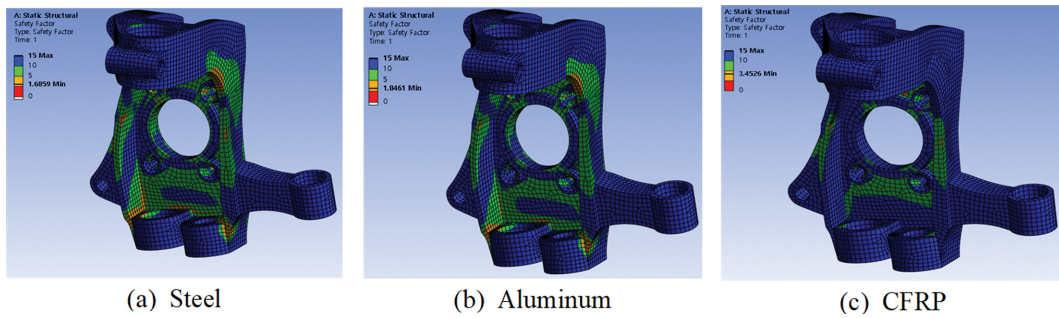


Fig. 9. Comparison of safety factor in front axle knuckles w.r.t. three different materials.

Table 6  
FEM analysis results of front axle knuckle w.r.t. three different materials

Analysis results	Steel	Aluminum	CFRP
Weight (Kg)	10.12	3.57	2.11
Total Deformation (mm)	0.053	0.15	0.37
Equivalent elastic strain (Max)	0.00083	0.0024	0.0057
Equivalent stress (MPa)	148.29	151.67	239.77
Safety Factor(Min)	1.69	1.85	3.45

에 발생한 최대 응력을 비교하여 구조물이 얼마나 안전하게 설계되었는지를 평가하는 중요한 지표다. 안전율은 식(12)과 같이 표현할 수 있다. 이 값이 1 보다 클 경우 구조물이 안전하다고 간주되며 1에 가까울수록 위험에 더 가깝다. 주로 안전율은 1.5 이상으로 설계를 한다.

$$S = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{max}} \quad (12)$$

이상의 조건을 바탕으로 전기차 전용 스티어링 너클의 유한요소해석을 실시하였으며, 3가지 적용 소재에 따른 해석 결과 및 안전율 분석결과를 Fig. 6~Fig. 9와 Table 6에 각각 나타내었다.

동일한 형상에 대해서 3가지 소재에 관해 구조해석을 진행했을 때 결과값은 변형량, 변형률, 등가응력을 나타내었다. 각 소재별 프론트 액슬 너클의 무게는 스틸 10.12 kg, 알루미늄 3.57 kg, CFRP는 2.11 kg을 나타냈으며,

CFRP 소재 적용의 경우 스틸 대비 79.1% 무게 절감, 알루미늄 대비 40.9% 절감효과를 나타내었다. CFRP의 최대변형량은 스티어링 너클의 휠 허브 부분과 로어암 및 어퍼암 사이를 연결부위 변형이 크게 나타났으며, 최대 0.37 mm를 나타냈다. 등가변형률 분포 계산결과는 3종의 소재 적용 모두 탄성변형률 범위내의 값을 나타내고 있는 것으로 분석되었으며, 스틸과 알루미늄합금 소재의 경우는 전체적으로 유사한 등가변형률 분포를 나타냈으나, CFRP 소재의 경우는 휠 허브 부분에 조금 더 큰 값을 보이고 있다.

유한요소해석결과에 따른 소재별 최대 등가응력값은 스틸이 148.29 MPa로 응력분포가 상대적으로 균일하며 주요 응력 집중 부위는 어퍼암과 로어암을 연결해주는 휠 허브 부분이다. 알루미늄의 최대 등가응력은 151.67 MPa로 휠 허브 부분과 로어암 부위에서 응력이 집중된다. CFRP의 등가응력은 239.77 MPa로 계산되었으며, 섬유 방향에 따라 등가응력값이 상이할 수 있으나, 계산결과

에서는 특히 연결 조향부품들과 연결조립되는 어퍼암과 로어암 부분, 휠 허브 부분에 과도한 응력집중이 되지 않는 것으로 확인되었으며, 휠 허브 평판과 연결된 사이드월 부분에 응력값이 조금 더 높게 나타난 것으로 보아, 향후 최적화시에 스티어링 너클의 역할에 큰 문제가 없다면, 설계변경 부분에 포함시키고자 한다.

안전율에 대한 해석결과에서 3가지 소재 모두 적정 안전율 범위에 있는 것으로 분석되었으며, CFRP 소재의 경우도 전륜 스티어링 너클의 구조특성상 과도한 등가응력집중 등이 발생하지 않아 안정된 안전율 설계가 가능한 적용가능한 소재로 판단된다.

## 6. 스티어링 너클의 설계 최적화

본 연구에서는 CFRP 소재 적용을 통한 전기차용 스티어링 너클 경량화를 목적으로 전륜 액슬 너클의 최적화 설계를 목표로 한다. 위상최적화 기법 적용을 위해 우선, 스티어링 너클의 조립과 기본 구조특성을 유지해야 하는 필수 형상요소들을 정의하여 위상최적화 대상 형상에서 제외하고, 다음, 너클에 가해지는 차량하중조건과 변형량 변화를 제한하면서도 전체 전륜 스티어링 액슬 너클의 질량을 줄여 경량화를 할 수 있도록 형상 밀도 재배치를 통해 최적화를 실시하였다.

최적화 제약조건으로는 컴플라이언스 즉 변형에너지를 최소화하여 물체의 변형을 줄이도록 제약함수로 설정하였고, 등가응력도 유지하거나 줄이도록 지정했다. Table 7에는 위상최적화를 진행하기 위한 매개변수 설정을 나타내었다. Definition에서 Maximum Number of Iterations는 최적화 해석의 최대 반복계산횟수를 지정하였으며, 최대 500번 까지 가능하며 수렴하기 전에 최대 횟수에 도달하면 해석이 종료되게 하였다. Minimum Normalized Density는 밀도의 최소값을 설정하였다. 요소가 제거되는 밀도 임계값을 나타내며 요소의 밀도가 0.001 이하로

Table 7  
SIMP phase optimization parameter setting

Reload Volume Analysis	
Reload Volume Fraction	off
Definition	
Maximum Number Of Iterations	500
Minimum Normalized Density	1.e-003
Convergence Accuracy	0.1%
Initial Volume Fraction	Program Controlled
Penalty Factor (Stiffness)	3
Region of Manufacturing Constraint	Include Exclusions
Region of Min Member Size	Include Exclusions
Region of AM Overhang Constraint	Exclude Exclusions
Filter	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled

낮아지면 해당 요소는 제거된다. Penalty Factor(Stiffness)는 해석 시 강성을 조정한다. 값이 클수록 강성이 높은 요소들이 선호되며 여기서 3은 높은 강성을 가진 설계를 유도하는 인자로 설정한 것이다. Region of Min Member Size는 최적화된 설계에서 최소 구성요소의 크기를 제어하게 된다. 설정을 하지 않으면 CFRP 적층판의 두께 최소값인 20 mm를 유지하지 않고 최적화가 진행된다.

매개변수를 설정한 후에는 최적화할 대상 형상 부분에 대한 설계 영역을 설정하였다. Figure 10에 나타낸 붉은색 부분은 설계 제외 부분으로, 다른 부품들과 결합을 하는 부분과 최소한의 두께를 유지해야 하는 부분에 다음과 같이 제약을 두었다. 더 자세한 해석을 위해서 설계 영역은 각자 다른 위치로 수정하며 반복 최적화를 진행했다. 초기 설정으로는 경계조건과 하중조건이 부여된 곳만 설계 제외영역으로 정했지만 최종 최적화된 형상이 올바르게 구성되지 않아 올바른 형상이 만들어질 수 있도록 재설정하며 최적화설계를 실시하였다.

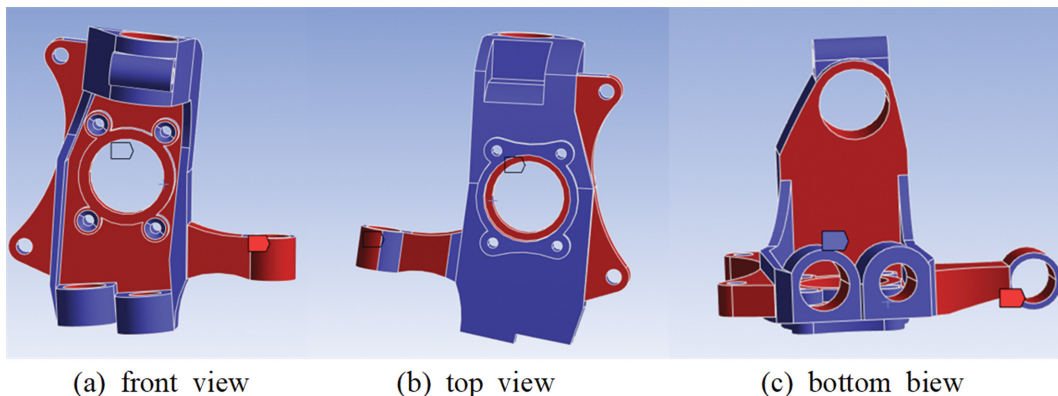


Fig. 10. Topological optimization region definition for front axle knuckle.

Table 8  
Topology optimization cases studies conditions for front axle knuckle

Case	Topology optimization conditions				Mass of Optimization results of front axle knuckle (Kg)
	Optimization Exclusion Region (OER) (EA)	Percentage to Retain Mass (PRM) (%)	Minimum Member Size (MMS) (mm)	Objective function	
1	22	50	20	Minimize compliance and mass	1.14
2	22	50	20	Minimize compliance and mass, Limit to equivalent stress	1.13
3	28	70	20	Minimize compliance and mass, Limit to equivalent stress	1.47
4	31	70	20	Minimize compliance and mass, Limit to equivalent stress	1.52
5	31	30	20	Minimize compliance and mass, Limit to equivalent stress	0.92
6	25	45	20	Minimize compliance and mass, Limit to equivalent stress	1.096

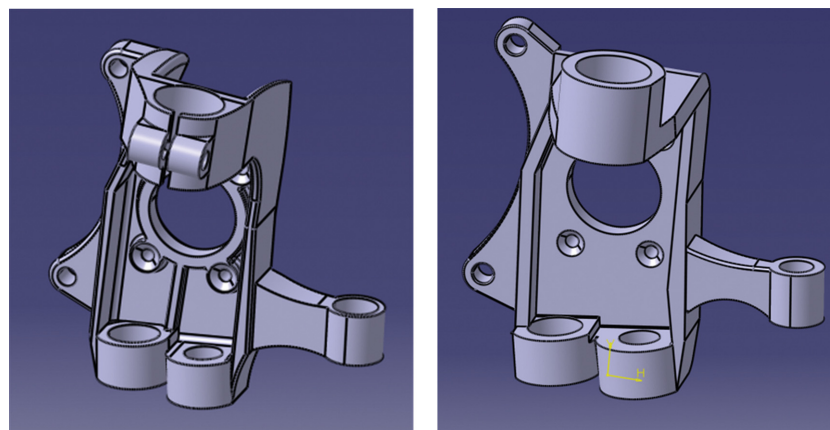
전륜 스티어링 너클의 위상최적화를 위해 진행한 총 6개의 Case 조건을 각 조건별로 Table 8에 정리하였다. 각 Case별로 설계제외영역(OER)과 최소유지질량(PRM), 최소유지두께(MMS), 목적함수(Objective function)를 각각 변경하여 최적화 계산을 수행하였으며, 특히 스티어링 너클 부품들과 조립이 유지되어야 하는 어퍼암, 로어암, 휠 허브, 캘리퍼 부착 부분, 타이로드 접합부 등은 필수적으로 설계제외영역으로 두었다. 또한, CFRP 전륜 스티어링 너클의 최적화 전의 질량은 2.11 kg이다.

최적화 목적함수는 Compliance와 Mass를 최소화하도록 설정하였으며 최대 등가응력값을 제약조건으로 부여하여 그 이하의 값을 만족하도록 위상최적화를 수행하였다. Compliance는 주어진 하중에 대해 부품의 변형 정도를 나타내는데 척도로서, 이를 최소화하는 것은 곧, 구조 강성의 최대화가 이루어지도록 하여 기존 형상 대비해석 변형량을 최소화시키는데 목적을 둔다. Mass를 목적함수로 두게 되면 질량을 최소화시키는 방향으로 최적화를 하게 되며, 최대 등가응력값은 CFRP 소재가 적용된 최적화 전 너클 형상의 해석결과에서 얻어진 239.77 MPa를

최대값으로 제한하였다. 1차 최적화 해석결과를 기반으로 하여 Response Constraint와 Manufacturing Constraint 항목 제한조건에서는 질량을 원래의 70% 이상과 최소 20 mm 이상의 형상을 남기도록 설정한 후에 위상최적화를 시행할 수 있다.

위상최적화 시뮬레이션 결과, 최소유지질량을 유지하면서도 가장 강성이 높은 구조를 얻기 위한 컴플라이언스 최소화 목적함수를 만족하는 최적설계안을 각각 얻을 수 있었다. 이 중에서 4번 case의 위상최적화 시뮬레이션 결과에서가 가장 만족할만 결과를 나타내었다.

또한, 최적화 결과, 어퍼암 연결부분의 형상 변화가 스티어링 너클에 연결되는 주요 부품과의 조립성에 문제가 발생할 수 있어 이에 대한 개선이 필요했으며, 기존 형상의 프론트 액슬 너클의 형태로는 CFRP를 적용하기에 적합하지 않은 형태 부분을 가지고 있어 이에 대한 설계 개선이 요구된다. 특히, 스티어링 너클과 연결되는 어퍼암, 로어암, 휠허브, 타이로드와 연결 조립되는 부분은 차량 전체 구조설계상 모두 고정된 채 재설계가 이루어졌으며, CFRP 소재를 적용한 너클 제작 시 차량 댐퍼



(a) Original front axle knuckle using aluminum material

(b) Re-designed front axle knuckle using CFRP material

Fig. 11. Comparison of front axle knuckle design change (a) original knuckle shape, (b) Re-designed knuckle shape.

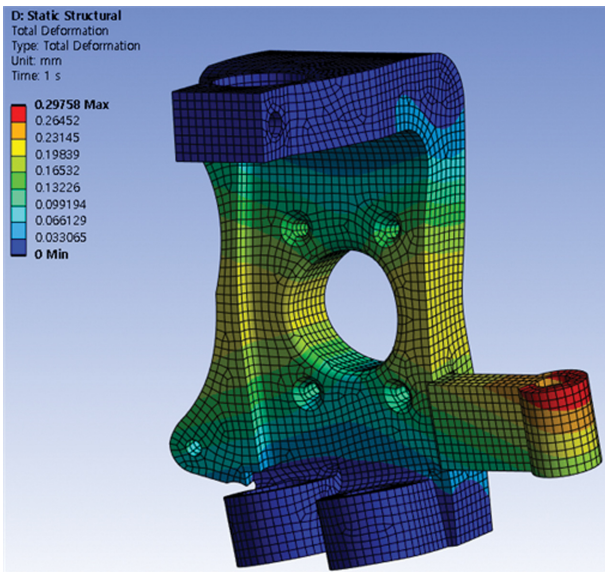


Fig. 12. Total deformation of Re-design CFRP front axle knuckle.

(damper)와 연결되는 너클 상단부 형상 및 너클 바디 내부의 리브(rib) 형상도 개선하였다.

이상의 각 case 조건별 유한요소해석결과와 위상최적화 분석결과를 종합하고, CFRP 소재 적용시 제조불량 최소화와 복합재료성형이 가능도록 Fig. 11과 같이 전륜 스티어링 너클에 대한 형상 재설계를 실시하고 최종 유한요소해석을 수행하였다.

재설계된 CFRP 소재를 적용한 전륜 스티어링 너클의 유한요소해석은 최적화전 해석과 동일한 경계조건과 하중조건을 적용하여 해석을 진행하였으며, Fig. 12에는 최대변형량 해석결과를, Fig. 13에는 등가변형률 분포, 등가응력 분포, 안전율 분포값을 각각 나타내었다.

Table 9에는 재설계된 CFRP 전륜 스티어링 너클의 기존 알루미늄 제품, 최적화전과 최적화후의 CFRP 소재 모델의 중량, 최대변형량, 등가응력, 안전율값을 각각 나타내었다.

이렇게 재설계된 CFRP 소재 적용 전륜 스티어링 너클의 중량은 1.76 kg으로 나타났다. 이는 기존 알루미늄 합금 소재 적용 형상 대비 50.7%의 중량 감소, 기존 CFRP 소재 적용 형상 대비 16.6%의 중량 감소 효과를 나타내었다.

특히 최종 재설계된 최적화된 전륜 스티어링 너클 모델 해석결과에서 보이는 바와 같이, 최대변형량은 최적화전 CFRP 모델 대비 24.3% 변형량 감소, 등가응력 값은 최적화전 CFRP 소재 모델 대비 53% 감소할 수 있었으며, 안전율도 조금 더 개선되는 효과를 나타냈었다. 이를 통해 위상최적화를 통해 확보된 제품형상 예측결과 반영과 함께 기존 금속소재를 적용한 스티어링 너클 구조와 대비하여 CFRP 소재를 적용하기 위해서는 구조강성 및 제조특성을 고려하여 불필요한 리브(rib)나 에지(edge) 등이 제거된 제품 재설계가 필요함을 의미한다.

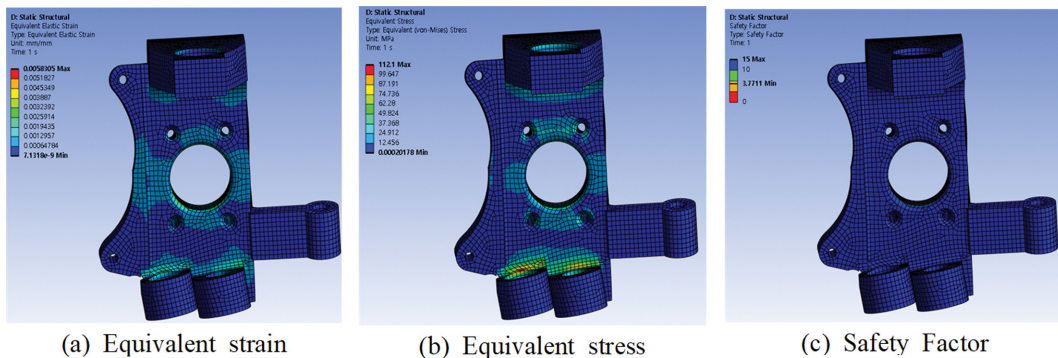


Fig. 13. FEM analysis results of in Re-designed CFRP front axle knuckles reflecting topology optimization simulation results and manufacturing process.

Table 9 Comparison of FEM analysis results between the Original front axle knuckle, Before optimization and the Final Re-designed optimized front axle knuckle

Analysis results	Original knuckle (Aluminum)	Before Optimization (CFRP)	Re-designed optimized knuckle (CFRP)
Weight (kg)	3.57	2.11	1.76
Total Deformation (mm)	0.15	0.37	0.28
Equivalent stress (MPa)	151.67	239.77	112.1
Safety Factor	1.85	3.45	3.77

## 7. 결 론

본 연구에서는 일렉트릭 모빌리티(전기차) 전륜 프론트 액슬 너클의 경량화를 통한 현가하 질량 감소와 성능향상을 위해 대표 복합소재중의 하나인 CFRP 소재를 적용하고, 제품형상에 대한 위상최적화를 수행하였다. CFRP를 활용한 설계를 통해 기존 알루미늄 합금 너클에 비해 약 50.7%의 중량 감소 효과를 얻을 수 있었으며, 기존 제품형상에 CFRP를 적용한 모델 대비하여 24.3% 변형량 감소, 53% 등가응력 감소 효과를 얻을 수 있었다. 최적화가 적용된 재설계된 최종 CFRP 너클의 중량은 1.76 kg으로, 기존 알루미늄(3.57 kg) 너클과 비교해 경량화의 목표를 상당 부분 달성하였다. 또한, 다양한 주행 조건(차량 정지, 가속, 감속, 코너링)에서 전륜에 작용하는 하중값을 등가치로 변환하여 유한요소해석에 적용하였으며, 특히 주행 시 발생하는 복합하중 조건에서도 충분한 강성을 유지함으로써, 경량화된 설계가 안전성에 미치는 영향을 최소화하였다.

본 연구를 통해 얻어진 결과와 경험은 향후 자동차 관련 기업에서 제품 개발시 요구되는 고품질 설계개발에 적용하고자 한다.

## 감사의 글

이 논문은 2024년도 한국교통대학교의 지원을 받아 수행한 연구임.

## References

- [ 1 ] T.S. Kwon, B.S. So, S.H. Oh and B.L. Choi, "A study on the design of CFRP materials for the automotive steering knuckle", *Journal of the Korean Society for Composite Materials* 28 (2015) 215.
- [ 2 ] D.G. Lee and P.K. Oh, "Design and manufacturing of composite automotive parts", *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers* 22 (2014) 345.
- [ 3 ] Y.C. Park, K.H. Lee, D.H. Lee and K.Y. Lee, "Shape optimization design of the knuckle using the orthogonal array and finite element analysis", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A* 37 (2013) 567.
- [ 4 ] H.B. Choi, S.H. Lee, K.H. Choi and J.S. Noh, "Fuel efficiency experiment according to the weight reduction of vehicle", *Proceedings of the Korean Society of Automotive Engineers Conference* (2012) 123.
- [ 5 ] H. Lim, J.H. Doh, S.H. Yoo, O. Kang, K.W. Kang and J.S. Lee, "Sizing optimization of CFRP lower control arm considering strength and stiffness conditions", *Journal of Computational Structural Engineering* 29 (2016) 389.
- [ 6 ] T700G Commercial Documentation, Toray Industries (2010).
- [ 7 ] S. Choi and W. Ji, "Effects of fiber arrangements on stress distributions over the transverse cross section of unidirectionally continuous fiber-reinforced composites", *Composites Research* 33 (2020) 30.