

강도 및 강성 조건을 고려한 탄소섬유강화플라스틱(CFRP) 로어 컨트롤 아암의 치수 최적설계

임주희¹ · 도재혁¹ · 유상혁¹ · 강오성² · 강건욱¹ · 이종수^{1†}

¹연세대학교 기계공학과, ²한국지엠

Sizing Optimization of CFRP Lower Control Arm Considering Strength and Stiffness Conditions

Juhee Lim¹, Jaehyeok Doh¹, SangHyuk Yoo¹, Ohsung Kang²,
Keonwook Kang¹, and Jongsoo Lee^{1†}

¹School of Mechanical Engineering College, Yonsei University, Korea

²GM Korea Technical Center, Korea

Received 19 July 2016; received in revised form 19 August 2016; accepted 24 August 2016

ABSTRACT

The necessity for environment-friendly material development has emerged in the recent automotive field due to stricter regulations on fuel economy and environmental concerns. Accordingly, the automotive industry is paying attention to carbon fiber reinforced plastic (CFRP) material with high strength and stiffness properties while the lightweight. In this study, we determine a shape of lower control arm (LCA) for maximizing the strength and stiffness by optimizing the thickness of each layer when the stacking angle is fixed due to the CFRP manufacturing problems. Composite materials are laminated in the order of 0°, 90°, 45°, and -45° with a symmetrical structure. For the approximate optimal design, we apply a sequential two-point diagonal quadratic approximate optimization (STDQAO) and use a process integrated design optimization (PIDO) code for this purpose. Based on the physical properties calculated within a predetermined range of laminate thickness, we perform the FEM analysis and verify whether it satisfies the load and stiffness conditions or not. These processes are repeated for successive improved objective function. Optimized CFRP LCA has the equivalent stiffness and strength with light weight structure when compared to conventional aluminum design.

Key Words: Carbon fiber reinforced plastic (CFRP), Finite element method, Lightweight, Composite, Sequential two-point diagonal quadratic approximate optimization (STDQAO)

1. 서 론

최근 전세계적으로 환경 문제와 에너지 절약이

강조됨에 따라 환경 친화적인 소재 개발의 필요성이 대두되고 있다. 특히 자동차산업 분야에서 이러한 추세가 뚜렷하게 나타나고 있으며 기업별 평균 연비 및 자동차 배기가스 규제강화에 따라 연비개선이 요구되고 있다. 대책으로는 자동차의 경량화가 가장 유력하며 이를 위해 차체 및 부품 등

[†]Corresponding Author, jleej@yonsei.ac.kr
©2016 Society for Computational Design and Engineering

다양한 분야에 복합재를 적용하고 있다. 이를 통해 차체 중량감소에 따른 에너지 절약뿐만 아니라 연비 향상과 이산화탄소 배출 감량을 기대할 수 있다.

차체 경량화를 위한 소재로 알루미늄 합금 등의 비철금속류가 주로 사용되어 왔으나 최근에는 일반 고분자 재료에 강화섬유가 보강된 고분자 복합재료가 금속소재를 대체해나가며 경량화 소재에 있어 선두주자로 자리 매김하고 있다^[1,2]. 대표적인 예로 탄소섬유와 플라스틱을 배합하여 강도를 높은 탄소섬유 강화플라스틱(CFRP)을 들 수 있다. 이 복합재료는 플라스틱의 뛰어난 성형성과 탄소섬유의 높은 강도의 장점을 조합한 것이다. 이는 고강도, 고탄성 소재이며 특히 가공성이 높은 첨단 복합재료 강화재이다. 이는 항공기 구조 등에도 핵심소재로 적용되고 있다^[3]. 또한, 로어 컨트롤 아암(LCA) 파트는 차량 샴시의 핵심부품으로써 차량의 성능 및 안전을 좌우한다. 1G의 코너링 시, 3.5G의 범프 및 2G의 제동력을 받는 등 하중 조건에서 취약한 파트로 여겨지기 때문에 경량화와 동시에 하중조건을 견디기 위한 충분한 강성이 필요하다.

Kong *et al.*^[4]의 연구결과에서는 기존 스틸 소재의 LCA의 경량화를 위하여 CFRP 소재를 적용하는 방안을 제시하였으며, Tsai-Wu 파괴기준으로 적층 복합재 구조물의 안전성을 판단하였다. 이를 위해 일반적인 적층 셀로 구성된 유한요소모델을 생성하여 관성제거(inertia relief) 해석을 통해 복합재 구조의 안전성을 확보할 수 있는 최적의 적층 플라이 수를 도출하였다.

Kim *et al.*^[5]은 마이크로 유전 알고리즘(Micro-genetic algorithm)을 사용하여 CFRP LCA의 경량화를 목표로 복합재의 적층 순서를 최적화하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 선형 섭동법(linear perturbation method)을 이용한 고유값 평가를 통해 좌굴하중 허용치를 최대화하고 static-Riks 방법을 이용하여 Tsai-Wu 파괴 기준을 바탕으로 정하중, 좌굴하중, 강성에 대한 성능 평가를 수행하였다.

본 논문에서는 기존의 알루미늄 LCA 부품을 CFRP로 대체하기 위한 최적화 연구를 위해 상용 코드 ABAQUS와 PIA노를 이용하여 복합재 적층 두께 최적화를 수행하였다. 제 2장에서는 LCA 설계를 위한 요구조건 및 구속조건을 수립하고, 기존 알루미늄 LCA의 성능평가를 수행한다. 다음 장에서는 복합재 적층과 관련된 이론을 기술하고,

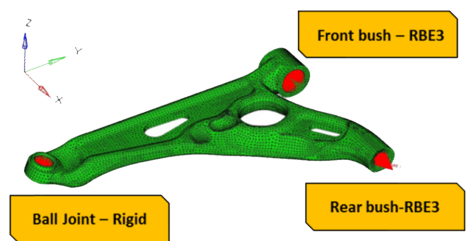
DIGIMAT을 사용하여 주어진 적층 각도에 따른 복합재 재료의 등가물성치를 산출한다. 제 4장에서는 주변 부품 간섭 및 제조상 측면을 고려하여 CFRP를 적용한 LCA 형상을 결정하고 최적화 설계를 위한 LCA 유한요소모델을 생성한다. 주어진 적층각에 대해 각 층의 두께를 최적화하는 방법론 및 산출된 최적 적층 두께를 LCA에 적용하여 검증 및 성능평가를 수행하였다.

2. 기존 알루미늄 LCA의 성능평가

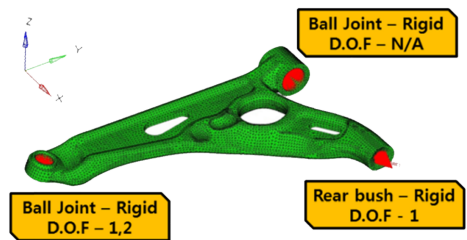
복합소재를 적용한 LCA의 최적설계를 수행하기에 앞서 기존에 사용되고 있는 알루미늄 소재의 LCA 형상을 바탕으로 유한요소해석을 진행하였다. 이는 기존 대비 복합재 LCA의 무게 및 성능 비교를 위한 기준값으로 이용할 목적이다. 사용된 재질은 A6082M이며 물성치는 Table 1과 같다. Fig. 1은 기존 LCA 형상에 대한 유한요소모델을 보여준다. 여기서 프론트 부시 및 리어 부시의 중심 점과 내부 표면 사이는 보간 요소(RBE 3)로 연결

Table 1 Material properties of conventional LCA

Material	A6082M
Density (ρ)	2.7e-9 ton/mm ³
Poisson's ratio (ν)	0.33
Young's modulus (E)	69000 MPa



(a) Boundary conditions of inertia relief analysis



(b) Boundary conditions of stiffness analysis

Fig. 1 FEM model of the conventional Aluminum LCA

결하였으며, 볼 조인트 중심은 강제 요소로 연결하였다. 응력해석에서는 총 39가지의 하중 조건을 고려하였고 병진방향 X, Y의 강성해석을 위하여 Fig. 1과 같은 조건들을 부여하였다.

응력 해석에서는 주행중인 차량의 내구 성능을 예측하기 위해 관성제거 방법을 적용하여 구속조건을 입력하지 않는다. 이는 구속되지 않은 구조물의 외력에 대한 거동 예측에 활용되는 기법으로써, 차량해석에 일반적으로 적용된다. 이론적으로는 외력에 대한 등가관성하중을 적용하여 강제 운동을 제거함으로써 동적 문제를 준정적(quasi-static) 문제로 치환하는 원리이다. 관성하중이 부여되므로 구조의 질량과 연관되지만 작용 하중의 크기에 따라 등가의 가속도가 부여되므로 최종 변위는 구조의 밀도와 무관하게 나타난다^[6]. 강성 해석에서는 각 프론트 부시, 리어 부시, 볼 조인트의 내경면 질점들과 중앙에 위치한 참조점 간에 1-D 강제 요소를 이용해 tie 조건을 부여하여 자유도를 감소시켰다. 또한, 프론트 부시, 리어 부시, 볼 조인트의 각 참조점에 모든 병진방향, Y-Z병진방향, Z병진방향의 자유도를 구속하였다^[7]. 하중조건으로 볼 조인트 참조점에 X 방향(lateral direction) 으로 1 kN의 하중을 부여하였고 이 때 발생하는 변위를 이용하여 평균 강성 값을 산출하였다. Y 방향(longitudinal direction) 또한 동일조건으로 수행하였다. 이를 통해 산출한 강성의 설계기준은 X 방향으로 2.5 kN/mm, Y 방향으로 50 kN/mm 이상이 되도록 선정하였다^[8].

ABAQUS를 이용하여 총 39가지의 하중 조건에 대해 관성제거 해석을 수행하였다. 이로부터 Table 2와 같이 총 4개의 하중 조건에서 높은 수준의 응력이 발생하였으며, 각 X, Y병진방향의 강성해석을 수행하여 기존 LCA의 강성조건이 만족함을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 하중 및 강성조건을 CFRP LCA설계에 고려하고자 한다.

Table 2 Results of inertia relief- and stiffness-analysis

Load conditions	Forward braking #3	Forward braking #4	Forward impact	Reverse braking #3
Stress (MPa)	263	375	183	292.6
	Stiffness X (kN/mm)		Stiffness Y (kN/mm)	
	3.07		62.80	

3. CFRP 물성치 및 모델링

3.1 복합재 물성치

CFRP LCA 제작 시 적용한 탄소섬유는 TORAY사의 T700^[9]이며 플라스틱 수지는 RESOTECH사의 Epoxy 1800^[10]이다. 탄소섬유의 체적비(volume fraction)는 0.6으로 고려하였으며 연속탄소섬유를 이용한 복합재료는 기계적, 열적, 전기적 특성 등이 섬유의 길이와 직경방향에 대해 상당한 차이를 보이는 이방성을 가진다. 섬유배열 방향(0°)의 인장, 굽힘, 압축특성은 섬유의 강도, 탄성률에 의해 결정되며, 섬유 배열 직각방향(90°)에서의 인장, 굽힘, 압축 및 전단특성은 주로 수지 및 계면이 지배 인자가 된다. 따라서 0° 방향의 인장강도와 탄성률은 대체적으로 섬유의 인장강도와 탄성률에 섬유의 체적 함유율을 더한 값으로 나타나며, 90° 방향의 특성은 대부분 수지에 따라 변화한다^[11].

본 연구에서 매트릭스로 사용하는 에폭시 수지는 단량체 형태로써 열경화성 고분자 복합재료에 속한다. 이는 매트릭스 수지가 상온에서 액상인 경우가 많다. 즉, 용융 점도가 낮아 특별한 공정 없이도 강인화제인 탄소섬유구조에 쉽게 침투시켜 합침 할 수 있다. 열경화성 고분자 복합재료의 형상제조 과정으로는 먼저 제품 형상 금형에 반경화된 프리프레그를 적층한 후 보호필름을 덮어 진공을 가한다. 이를 유지하면서 오토클레이브(autoclave)에 넣어 단계적으로 열을 가하여 경화반응을 진행시키고, 냉각공정을 통해 CFRP LCA를 제조한다^[11].

탄소섬유와 에폭시 각각의 물성치를 다상 재료의 비선형거동을 예측하는 모듈인 DIGMAT에 입력하고 Mori-Tanaka 평균장(mean field) 이론을 이용하여 복합재의 등가물성치를 예측하였다. 이 이론은 모재 속에 강화재가 규칙적으로 배열된 것으로 가정하고 단위 격자에 균질화 기법을 적용함으로써 복합재의 등가물성치와 인장특성을 고려한다^[12]. 응력-변형률 선도는 Fig. 2와 같으며, 이로부터 단일 방향 탄소 섬유 강화 플라스틱의 탄성계수, 전단계수와 포아송비를 계산하였으며 이를 Table 3에 나타내었다.

본 연구에서는 시제품 제작을 위해 0°와 90°의 uni-direction 방향과 45°와 -45° 두 방향이 함께 교차되어 있는 탄소섬유 시트를 사용한다. 이와 같은 제조공정, 준 등방성 물성 및 충돌 에너지 흡수율 향상 등의 측면을 고려하여 복합재의 적층 각

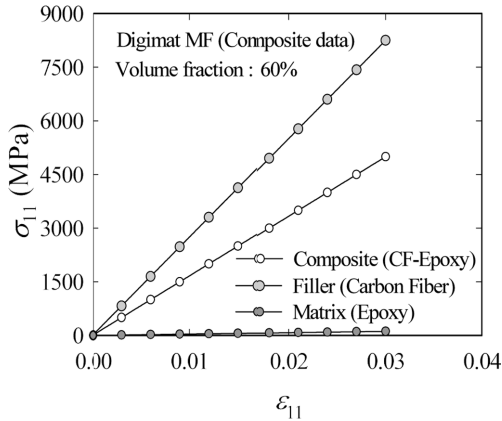


Fig. 2 Stress-strain curve of carbon fiber and epoxy

Table 3 Material properties of uni-directional ply

ρ (ton/mm ³)	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)
1.64e-9	139290	9117.4	3487.4
ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}	
0.286	0.0187	0.388	

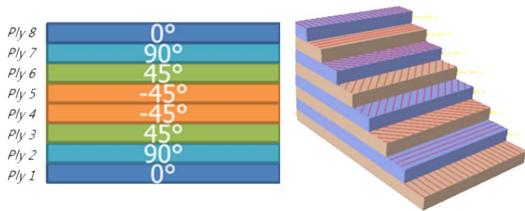


Fig. 3 Stacking order and section cut

Table 4 Material properties of the initial laminated CFRP

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)
53593	53593	12008
G_{12} (MPa)	G_{23} (MPa)	G_{31} (MPa)
20443	4057.8	4057.8
ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}
0.311	0.277	0.0620

도는 0°, 90°, 45°, -45°의 순서로 선정하였다. Table 3의 단일 방향 물성치를 사용하여 Fig. 3과 같이 대칭구조로 총 8 plies를 적층한 경우의 CFRP 등가물성치를 DIGIMAT을 이용하여 산출하였다. 또한 복합재의 등가물성치는 총 두께가 아닌 각 적층 각도별 두께 비율에 따라 변화하는 것을 확인하였다. 각 층의 두께는 탄소 섬유 직경을 고려하여 최소 0.146 mm 이상으로 설정하였으며 전체 적층 두께는 초기값인 20 mm로 설정하였다. Table

4는 두께 최적화를 위한 초기값으로써 CFRP의 각 층을 동일한 두께로 적층한 경우에 대한 물성치를 나타낸다.

3.2 CFRP LCA 모델링

선행연구^[13]에서는 기존 알루미늄 LCA 형상에서 CFRP를 적용한 LCA의 설계를 위한 위상최적화를 수행하였으며 그 결과 알루미늄 모델과 비교하였을 때 상부 표면이 다소 단순화된 형상으로 나타난다. 이 때 자동차 샤시 내부에서 다른 부품과 연결되는 볼 조인트, 프론트 부시 및 리어 부시 세 파트와 주변 부품이 통과되는 중심의 구멍은 위상최적화 설계 영역에서 제외하였다. 이를 통해 도출된 형상을 바탕으로 시제품 제작을 위한 금형 모델링을 수행하였으며 이 때 CAD 모델링(Fig. 4)의 표면이 평활화(smoothing)됨에 따라 위상최적화 치수와 다소 차이가 발생하였다. 또한 다른 부품과의 간섭을 추가적으로 고려함에 따라 볼 조인트와 리어 부시 사이가 오목한 곡면형상을 갖도록 설계가 변경됨으로써 구속조건에 위배되었다. 본 연구에서는 시제품 제작용 금형의 추가적인 설계 변경을 방지하기 위하여 복합재 각 층에 적층되는 두께를 최적화 함으로써 구속조건을 충족시키도록 하였다. 이를 위해 CFRP LCA 캐드 모델을 바탕으로 Fig. 5와 같이 쉘 요소를 이용한 3차원 유한요소모델을 생성하였다. 이는 쉘 요소(S4R)로

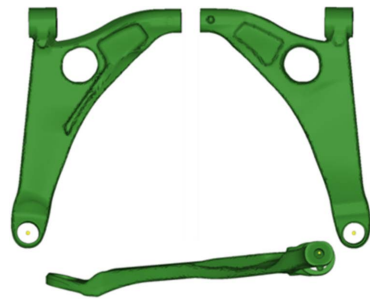


Fig. 4 Geometric model of CFRP LCA



Fig. 5 Finite element shell model of CFRP LCA

구성되어 있으며, 요소와 절점은 각각 총 24,173 개, 24,568개로 생성하였다. 셸 요소의 법선 벡터 방향은 LCA 형상의 윗면을 기준으로 아래방향으로 적용 되도록 적용하였다. 이를 이용하여 기존 LCA에 대한 경계, 하중, 강성 조건과 동일하게 해석을 수행하였다.

4. 근사최적화 설계

4.1 최적화 설계 문제 정식화

복합재의 적층 각을 0°, 90°, 45°, -45° 순서의 대칭구조로 설정하여 각 층의 두께를 2.5 mm로 동일하게 적층한 경우에는 X와 Y 방향 강성이 설계 기준에 불만족 하는 것을 확인하였다. 이에 따라 X와 Y 방향 강성을 최대화하는 것에 중점을 두어 이를 목적함수로 선정하였으며, 제한조건에 각 강성의 하한값을 부여함으로써 최적화 조건을 보수적으로 접근하였다.

설계변수는 각 층의 적층 두께로 설정하였으며, 4개의 두께층이 대칭으로 적층되도록 설정하여 본 연구의 최적화 문제를 아래와 같이 정식화 하여 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } t_i = [t_1, t_2, t_3, t_4]^T \\
 & \text{Maximize } \textit{Stiffness } X, \textit{Stiffness } Y \\
 & \text{Subject to } \sigma_j \leq 400 \text{ MPa } (j = 1\sim 4) \\
 & \quad K_{x-dir} \geq 2.5 \text{ kN/mm} \\
 & \quad K_{y-dir} \geq 50 \text{ kN/mm} \\
 & \quad \sum t_i = 20 \quad (i = 1\sim 4) \quad (1)
 \end{aligned}$$

X와 Y 두 방향의 강성에 대해 고려하는 다중 목적함수이기 때문에 가중치-합 기법(weight-sum method)을 사용하였으며 수식은 다음과 같다. 이때, 가중치(ω)는 동일하게 0.5로 설정하였으며 P는 선호함수, f는 목적함수, s는 스케일, α 는 +1 또는 -1의 부호를 나타낸다.

$$\text{Maximize } P[f_i] = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{\omega_i}{\sum \omega_i} \left(\frac{f_i}{s_i} \right) \quad (2)$$

$$\text{여기서 } s_i = \begin{cases} |f_i^0| & \text{if } |f_i^0| > \varepsilon \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}, \text{ where } \varepsilon = 10^{-7} \quad (3)$$

CFRP LCA의 적층각 별 두께 최적화 과정을 위

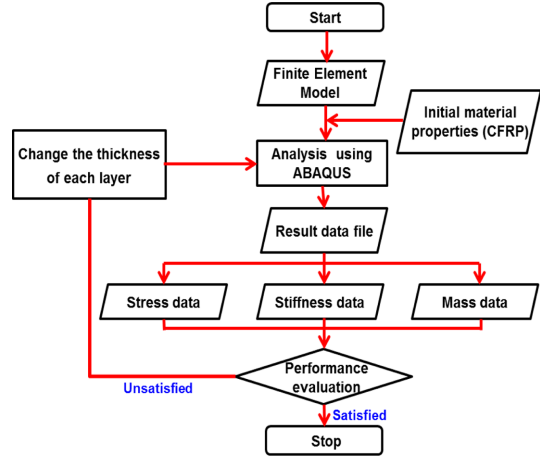


Fig. 6 Process of optimization

해 먼저 CAD 모델을 이용하여 유한요소모델을 생성한다. 이를 ABAQUS에서 импорт(import)하여 동일 두께로 적층된 복합재의 등가물성치를 입력하고 하중 조건을 적용하여 초기 성능값을 확인하였다. 또한, 해석 자동화를 위해 ABAQUS 배치 파일을 이용하여 설계변수 및 데이터의 매핑(mapping)을 통해 각 층의 최적화를 수행하였다. Fig. 6과 같은 일련의 과정을 통해 도출된 최적 두께를 DIGIMAT에 적용하였으며 이로부터 산출된 등가물성치를 동일 조건하에서 기존 알루미늄 LCA와 성능 비교검증을 수행하였다.

최적 두께를 산출하기 위한 최적화 기법으로는 구배법(gradient method)을 이용한 이점 대각 이차 근사화 기법(sequential two-point diagonal quadratic approximate optimization, STDQAO)을 사용하였다[14,15]. 통합된 CAE 기반 최적화 설계 환경 구축을 위해 PIDO(process integration and design optimization) 툴인 PIANo에서 해석 자동화를 수행하였다. 해석 자동화는 엔지니어가 설계 변경을 수행하는 반복 과정을 자동화 할 수 있도록 프로그래밍하는 것이다. 본 연구에서는 설계변수인 적층 두께가 상/하한 범위 내에서 변경되면 이로부터 복합재의 등가물성치가 결정된다. 해석 모델에 대해 배치 파일이 실행되면 앞서 입력된 물성치에 해당되는 응력 및 강성값이 도출되고, 사용자가 지정해둔 순서에 따라 성능 특성치들을 반복적으로 추출하므로 수동 작업으로 인한 오류의 발생을 크게 줄일 수 있다. 해석과정에 대한 자동화 설정이 완료되면 목적함수와 구속함수를 고려

하여 근사화 및 최적화를 반복하며 순차적 근사화가 이루어진다^{6,7)}.

4.2 최적화 결과

최적화를 통해 도출된 각 층의 최적 두께는 Table 5에 나타내었다. 초기값 2.5 mm의 경우와 비교하였을 때 90°에서의 두께가 다소 감소하였고 -45°에서의 두께가 크게 증가한 것을 볼 수 있다. 최적해를 검증하기 위해 DIGMAT을 이용하여 각 층의 최적 두께를 입력하여 등가물성치를 산출하였으며 이를 Table 6에 나타내었다. 기존 등가물성치 대비 탄성계수와 전단계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

최적해 검증을 위해 최적 두께로부터 산출된 물성치를 CFRP LCA 유한요소모델에 입력하여 동일한 경계조건 및 하중 조건에서의 응력 및 강성값을 확인하였다. 모든 제한조건을 충분히 충족시키는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 목적함수 X 방향의 강성의 경우는 설계기준 2.50 kN/mm 이상인 2.78 kN/mm로 나타나며 Y 방향의 강성 또한 설계기준 50 kN/mm 이상인 58.48 kN/mm로 산출되었다. 더불어 LCA의 총 무게는 기존 알루미늄 모델의 1.7 kg에서 CFRP 적용 시 1.276 kg으로 약 25% 경량화 효과를 볼 수 있었다. 이에 대한 결과를 Table 7-8에 나타내었다.

Table 5 Optimized thickness of each plies

The number of ply	Stacking angle	Thickness (mm)
Ply1/Ply8	0°	2.088
Ply2/Ply7	90°	1.798
Ply3/Ply6	45°	2.064
Ply4/Ply5	-45°	4.049
Total thickness (mm)		20

Table 6 Material properties of the optimized laminated CFRP

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)
65053	54201	12499
G_{12} (MPa)	G_{23} (MPa)	G_{31} (MPa)
25583	4165.8	4242.3
ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}
0.3866	0.2869	0.0494
ν_{21}	ν_{32}	ν_{13}
0.3221	0.0662	0.2571

Table 7 Inertia relief results of optimized design (Max. principal stress, MPa)

Load conditions	Forward braking #3	Forward braking #4	Forward impact	Reverse braking #3
Stress criteria	≤400 MPa			
Conventional design	263.0	375.0	183.0	292.6
Optimized design	263.6	354.6	194.4	288.7

Table 8 Stiffness analysis results of optimized design

Load conditions	Stiffness X (kN/mm)	Stiffness Y (kN/mm)
Stiffness criteria	≥2.50	≥50.00
Conventional design	3.07	62.80
Optimized design	2.78	58.48

5. 결 론

본 연구에서는 CFRP의 제조상의 문제로 적층 각도가 정해져 있는 경우에 대해 LCA의 강성을 최대화시키는 최적 적층 두께를 도출하였다. 이를 위해 복합재의 적층각을 0°, 90°, 45°, -45°의 순서로 적층하고 대칭구조를 가지도록 하였다. 적층 두께 최적화를 위해 순차적 이점 대각 이차 근사 최적화(STDQAO) 기법을 적용하였으며 상용최적화(PIDO) 코드를 사용하여 ABAQUS와의 연동을 통해 적층 두께 상/하한 범위 내에서 하중 및 강성 조건의 만족여부를 판별하였다. 그 중 모든 조건을 만족하는 최적 두께 값을 DIGIAMT에 재입력하여 등가물성치를 산출하였고 이를 바탕으로 유한요소해석을 통해 하중 조건에 따른 성능을 검증하였다. 복합재의 적층 두께가 최적화된 CFRP LCA는 알루미늄 설계와 동등한 강성과 강도를 가지는 반면 무게는 기존 설계 대비 25% 정도 경량화된 설계 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 LCA 설계에 복합재료를 적용할 경우 각 층의 두께를 최적화함으로써 경량화됨과 동시에 구속조건에 대하여 알루미늄을 적용한 설계와 상응하는 성능을 가질 수 있으므로 복합재를 이용한 설계 시 이를 고려할 필요가 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 적층 두께뿐만 아니라 적층 각도의 순서 또한 설계변수로 선정하고 최적화 기법으로는 마이크로 유전 알고리즘(Micro-GA)을 적용하여 LCA의

경량화 및 성능 향상을 위한 최적화 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

This research was supported by GM Korea. (Development of BEV Front Lower Control Arm Using Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Material : 2015-11-0604).

References

1. Khan, S.U., Munir, A., Hussain, R., and Kim, J.K., 2010, Fatigue Damage Behaviors of Carbon Fiber-reinforced Epoxy Composites Contacting Nanoclay, *Compos. Sci. Technol.*, 70, pp.2077-2085.
2. Kim, K.S., Bae, K.M., Oh, S.Y., Seo, M.K., Kang, C.G., and Park, S.J., 2012, Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Lightweight Vehicles, *Elastomers and Composites*, 47(1), pp.65-74.
3. Chung, D.D.L., 1994, Carbon Fiber Composite, Butterworth-Heinemann, Boston.
4. Kong, K., Park, Y.B., Park, H.W., Keum, J.W., Jeong, H.S., and Jung, Y.B., 2011, Design Optimization of the Lower Arm using the Carbon Fiber Reinforced Polymer(CFRP), *Proceeding of the KSAE Annual Meeting*, pp.33-37.
5. Kim, D.H., Choi, D.H., and Kim, H.S., 2014, Design Optimization of a Carbon Fiber Reinforced Composite Automotive Lower Arm, *Composites: Part B*, 58, pp.400-407.
6. Kim, C. and Jung, K., 2011, A Study on the Analytic Evaluation of the Vehicle Body Stiffness, *Proceeding of the KSAE Annual Meeting*, pp.1501-1504.
7. Nithin, K. and Veerasha, R., 2013, Analysis of Front Suspension Lower Control Arm of an Automobile Vehicle, *International Journal of Science and Research*, 2, pp.51-56.
8. Heo, S.J., Kang, D.O., Lee, J.H., Kim, I.H., and Darwish, S.M.H., 2013, Shape Optimization of Lower Control Arm Considering Multi-disciplinary Constraint Condition by Using Progress Meta-model Method. *International Journal of Automotive Technology*, 14, 499-505.
9. T700 Product Catalog, Toray Carbon Fibers America, Inc.
10. Epoxy1800 Product Catalog, Resoltech.
11. Kim, S.T., 2013, Development Trend for Thermoplastic Polymer Composite, *Polymer Science and Technology*, 24(1), pp.25-29.
12. Mori, T. and Tanaka, K., 1973, Average Stress in the Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions, *Acta Metallurgica*, 21, pp.571-574.
13. Lee, J., Kang, K., Lim, J., Yoo, S.H., and Doh, J., 2016, Development of BEV(Battery Electric Vehicle) Front Lower Control Arm Using Carbon Fiber Reinforced Plastic Material, Yonsei University, Final Report, pp.31-41.
14. Song, C.Y. and Lee, J., 2010, Comparative Study of Approximate Optimization Techniques in CAE Based Structural Design, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 34(11), pp.1603-1611.
15. Kim, M.S., Kim, J.R., Jeon, J.Y., and Choi, D.H., 2001, Design Optimization Using Two-Point Diagonal Quadratic Approximation, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 25(9), pp.1423-1431.
16. *PIAnO (Process Integration, Automation and Optimization) User's Manual*, 2008, Version 2.4, FRAMAX Inc.
17. Lee, G., Park, J.M., Choi, B.L., Choi, D.H., Nam, C.H., and Kim, G.H., 2012, Multidisciplinary Design Optimization of Vehicle Front Suspension System Using PIDO Technology, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, 20(6), pp.1-8.



임 주 희

2011년 경희대학교 우주과학 학사
 2013년 경희대학교 우주탐사학 석사
 2013년~2015년 카이스트 인공위성
 연구센터 재직
 2015년~현재 연세대학교 기계공학
 박사과정
 관심분야: 확률통계기반 최적설계,
 복합재료, 유한요소해석, 머신러닝



강 오 성

1990년 한국과학기술원 생산공학
 과 학사
 1990년~현재 한국지엠 기술연구소
 재직
 관심분야: 자동차 부품 최적설계,
 구조해석, 복합재료



도 재 혁

2011년 인제대학교 기계자동차공
 학부 학사
 2013년 경북대학교 기계공학 석사
 2013년~현재 연세대학교 기계공학
 박사과정
 관심분야: 유한요소해석, 확률통계
 기반 최적설계, 기계학습, Prognostics Health and Manage-
 ment (PHM)



강 건 욱

2001년 포항공과대학교 기계공학
 학사
 2004년 Stanford University 기계
 공학 석사
 2011년 Stanford University 기계
 공학 박사
 2013년~현재 연세대학교 기계공
 학부 조교수
 관심분야: 전산재료역학, 멀티스케
 일 전산모사, 분자동역학, 전위
 동역학



유 상 혁

2013년 홍익대학교 기계시스템디
 자인공학과 학사
 2013년~현재 연세대학교 대학원
 기계공학과 석박사통합과정
 관심분야: 2차원 재료의 기계적 물
 성 예측



이 종 수

1990년 연세대학교 기계공학 학사
 1992년 University of Minnesota
 항공우주공학 석사
 1996년 Rensselaer Polytechnic
 Institute 기계공학 박사
 1996년~1997년 Rensselaer Rotor-
 craft Technology Center 근무
 1997년~현재 연세대학교 기계공학
 부 교수
 1998년~1999년 생산기술연구원
 자문교수
 2002년~현재 (주)이센스테크놀로지
 자문교수
 관심분야: 멀티피직스 CAE 및 최
 적설계, 품질공학설계, 소프트컴
 퓨팅/인공지능/머신러닝