

&lt;학술논문&gt;

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2024.48.4.271>ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 주응력 방향으로 배치된 연속 탄소섬유 강화 복합재료 로어 컨트롤 암의 구조 및 진동 특성 분석

박 거 락\*,\*\* · 조 락 균\*\*

\* 서울과학기술대학교 MSDE 학과 구조 비선형 거동 평가 연구실,

\*\* 현대모비스 미래기술융합 해석 연구팀

### Structural and Vibration Analysis of Lower Control Arm Made of Continuous Carbon Fibre Reinforced Plastic with Fibre Path in Principal Stress Direction

Georak Park\*,\*\* and Nak-Kyun Cho\*\*

\* Non-linear Structural Behaviour Assessment Lab (NoBA Lab), Department of Manufacturing Systems and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech),

\*\* CAE Team, Future Technology Convergence Institute, Hyundai Mobis

(Received January 11, 2024 ; Revised February 26, 2024 ; Accepted February 26, 2024)

**Key Words:** Continuous Carbon Fiber Reinforced Plastic(연속 탄소섬유강화플라스틱), Lower Control Arm(로어 컨트롤 암), Structural Analysis(구조 해석), Frequency Response Analysis(주파수 응답해석)

**초록:** 탄소 섬유 복합재료(CFRP)는 가벼운 무게 대비 우수한 기계적 성능을 가지고 있어 경량화가 필요한 자동차 산업에서 다양하게 활용되고 있다. 최근에는 3D 프린터를 비롯한 적층제조 기술의 발전으로 탄소섬유 경로를 디자인하여 구조물의 기계적 성능 증가시키는 연구들이 진행 중이다. 단방향 섬유경로의 탄소섬유 복합재료에 대한 구조 건전성 평가 연구는 많이 소개되었지만, 주 응력 방향 탄소섬유 경로를 적용한 연구는 아직 부족하다. 게다가, 탄소섬유 복합재료를 유한요소모델로 생성할 때 복잡한 모델링 과정을 거쳐야 하는 어려움이 있다. 따라서 본 연구는 Python code를 활용하여 CFRP가 적용된 로어 컨트롤 암의 유한요소 모델을 단순하게 생성하는 방법을 제시한다. 또한, 단방향 CFRP 모델과 주 응력 방향 CFRP 모델에 따른 로어 컨트롤 암의 무게, 구조, 진동 특성을 기존 알루미늄 재질의 로어 컨트롤 암 모델과 비교하여 평가한 결과를 제시한다.

**Abstract:** Carbon fibre reinforced plastic (CFRP) is widely used in the automotive industry for its excellent mechanical performance relative to its lightweight properties. Recent advancements in additive manufacturing technologies like 3D printing have allowed for the design of carbon fibre paths to enhance mechanical properties. Although there are many studies on carbon fibre composite materials on the uniaxial fibre path, there is still a lack of research that designed customized carbon fibre paths using 3D printing. Moreover, generating a finite element model of carbon fibre composite involves complex pre-processing. Therefore, this study presents a method for simplifying the generation of finite element models for CFRP-applied lower control arms using Python code. Additionally, comparative studies are performed for aspects of weight, structural integrity, and vibration characteristics of the lower control arm model based on unidirectional CFRP models and principal stress direction CFRP models against the conventional aluminum lower control arm model.

- 기호설명 -

$\rho$  : 밀도  
 $E$  : 탄성계수

$\nu$  : 푸아송 비  
T.S : 인장 강도

#### 1. 서 론

carbon fibre reinforced plastic)은 가벼운 무게 대비 우수한 강도, 강성을 가지는 재료이다. 따라서 경량화를 달성하기 위해 항공, 우주, 모빌리티 등 다양한 산업에서 활용되고 있다.<sup>(1-5)</sup> 최근 3D 프린팅을 포함한 적층 제조(additive manufacturing)의 우수한 디자인 자유도를 활용하여 연속 탄소섬유 강화플라스틱의 기계적 성능을 향상시키는 연구들이 소개되었다.<sup>(6-9)</sup> 특히, 탄소섬유는 작용하는 하중의 방향으로 섬유를 배열하면, 구조물의 기계적 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

Zhang 등<sup>(10)</sup>은 주 응력 방향의 섬유 경로 배치 방법을 제시하였다. 또한 유한요소해석을 통해 동일한 부피분율에서 단방향 섬유와 비교를 통해 주 응력 섬유경로배치의 우수한 기계적 성능을 입증하였다. Malakhov 등<sup>(11)</sup>은 유한요소해석을 통해 곡선 섬유경로를 가진 CFRP가 직선 섬유 경로에 비해 응력집중 계수를 3.2배 감소시키는 것을 소개하였다. Park 등<sup>(12)</sup>은 최대 주 응력 섬유 경로를 가지는 CFRP의 우수한 기계적 성능은 유한요소해석 및 실험을 통해 규명하였다.

현재 에너지와 환경 규제로 인해 자동차 산업에서 연비향상을 위해 차량 경량화가 필수적이다. 이러한 동향은 차량의 로어 컨트롤 암 설계에도 영향을 미치고 있으며, 대안 중 하나로 CFRP 적용을 고려한 연구가 진행되고 있다.<sup>(13-15)</sup> Lim 등<sup>(13)</sup>은 로어 컨트롤 암의 소재를 CFRP로 대체하기 위해 단방향 섬유경로를 따르는 CFRP의 적층 각도 최적화 연구를 수행하였다. Kim 등<sup>(14)</sup>은 CFRP 소재의 로어 컨트롤 암의 적층 순서를 최적화하고 Tasi-Wu 파괴 기준으로 강성, 좌굴하중, 정하중에 대한 성능평가를 진행하였다.

현재까지 CFRP를 적용한 로어 암 관련 연구는 단방향 섬유경로의 탄소섬유 복합재료를 사용한 연구들이 대부분이고 구조 강진성을 높이기 위해 섬유 경로를 디자인한 맞춤형 탄소복합재료를 적용한 연구는 부족하다. 또한 로어 암의 강도, 강성 측면의 구조해석을 진행한 논문은 보고되었지만 진동 특성을 분석한 연구들은 부족하다. 그리고 CFRP 재료의 특성 상 복잡한 유한요소해석 전처리 과정을 가진다.

따라서, 본 연구에서는 python code를 활용하여 3D 프린터를 통해 제작되는 CFRP 소재의 로어 암의 유한요소 모델링 방법을 소개한다. 또한 선형 해석을 통해 로어 암에 발생하는 주 응력 분포를 따라 탄소섬유를 배치한 모델의 무게, 구조, 진동 특성을 단방향으로 탄소섬유 경로를 배치한 모

델 및 기존의 알루미늄 로어 암 모델과 비교 평가한다.

본문 2장에서는 CFRP의 유한요소 모델링 과정을 단순화하는 Python code를 설명한다. 3장은 해석에 사용된 유한요소 모델에 대해 기술한다. 4장에서는 3가지의 로어 암 모델의 (단방향 CFRP, 주응력 방향 CFRP, 알루미늄 모델) 구조, 진동 평가 결과가 기술되었다. 5장은 본 연구의 결론 및 제언을 기술한다.

## 2. CFRP 유한요소모델방법

### 2.1 복합재료 유한요소해석 접근법

복합재료의 다양한 특성 때문에 유한요소해석 시 재료의 거동과 해석 시간을 고려하여 micro, meso, macro-scale 접근방식이 필요하다.

Micro-scale 분석은 미시적으로 matrix와 fibre의 상호작용에 집중하는 방식으로 재료의 거동에 집중하고 homogenization한 물성 획득이 목적이다. 따라서 matrix, fibre 그리고 matrix-fibre interface를 각각 모델링하기 때문에 모델링 과정이 복잡하고 해석시간이 길다. 일반적으로 representative volume element (RVE)를 통해서 해석한다.<sup>(16,17)</sup>

Macro-scale 분석은 복합재료를 거시적으로 이방성 재료로 취급하여 적용한다. 이때 재료의 물성을 시험이나 micro-scale 분석을 통해 얻은 재료 물성을 적용한다. 따라서 모델링 과정은 단순하나 복합재료의 많은 기본 특성을 무시하고 재료거동에 대한 세부정보를 제공할 수 없다. 일반적으로 laminate composite modeling 을 통해 해석한다.<sup>(7, 18)</sup>

3D 프린터로 제작되는 CFRP의 경우 하나의 layer에 단방향 섬유가 아닌 각각의 방향성을 가진 섬유경로를 가진다. 따라서 재료의 물성을 homogenization 시키기 어렵기 때문에 meso-scale의 접근법이 필요하다. 본 연구에서는 matrix와 fibre를 각각 모델링한 후 embedded element technique<sup>(7)</sup>으로 구속 조건을 부여하여 해석하는 meso-scale의 접근법을 활용하였다. 이런 방식을 통해 CFRP 재료의 미시적인 거동과 구조의 거시적인 거동을 동시에 확인할 수 있다. 또한, embedded element technique은 matrix와 fibre의 독립적으로 mesh를 생성한다. 따라서 mesh 생성 과정이 단순하고 해석 결과를 matrix와 fibre domain에서 각각 확인이 가능하다.

### 2.2 G-code 를 활용한 섬유경로 모델링

Meso-scale을 사용한 접근법은 복합재료의 matrix

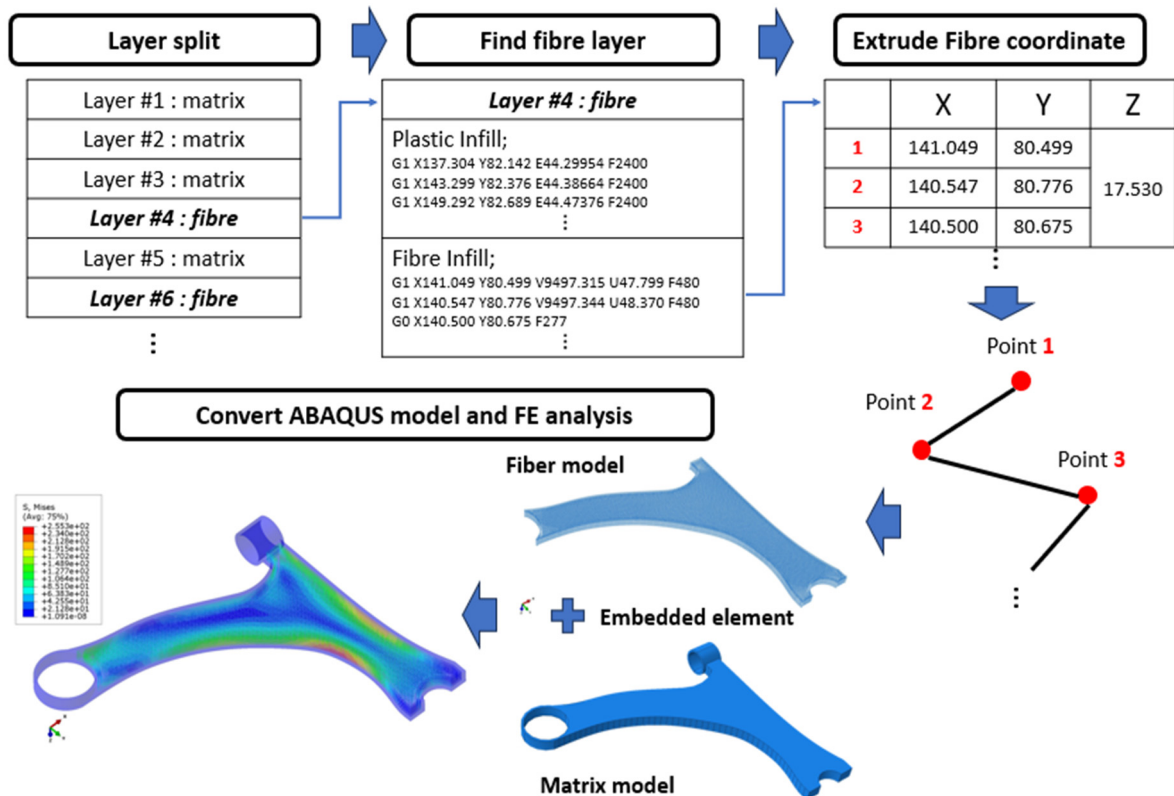


Fig. 1 Schematic of FE model generation using Python

와 fibre를 각각 모델링 하기 때문에 유한요소모델 생성 과정이 복잡하다. 이 과정을 단순화하기 위해 3D 프린터의 G-code와 python code를 활용하였다. 복합재료 3D 프린터는 G-code 기반으로 제품을 제작하며, 직교 좌표계 기반으로 탄소섬유와 플라스틱을 배치한다. G-code를 3D 프린터 모델 생성 프로그램으로부터 추출하여 유한요소 모델로 변환시킬 수 있는 python code를 개발하였다.

Fig. 1은 G-code와 python code를 활용한 탄소섬유 강화 복합재료 유한요소모델을 생성하는 계략도이다. G-code에는 다양한 명령어가 포함되어 있는데 그 중 섬유경로 프린팅에 관련된 명령어만 추출하여 python code를 통해 beam element 경로를 생성한다. 이후 ABAQUS(ver. 2023)에서 제공하는 embedded element technique을 사용하여 생성된 beam element를 탄소섬유로 모델링하고 matrix 모델과 결합하여 복합재료 모델을 생성한다.

본 연구에서 개발한 python code를 사용하면, 복잡한 형상의 탄소섬유 복합재료 모델을 유한요소 모델로 쉽게 생성할 수 있어, 3D 프린터로 제품 출력 전 다양한 섬유경로를 가지는 구조물의 기계적 성능을 평가하여 건전성 검증 시간과 재료의 낭비를 줄일 수 있다.

### 3. 유한요소모델

본 연구에서는 알루미늄 모델(conventional model)과 CFRP를 적용한 단방향 모델(uniaxial model), 그리고 주 응력 방향 모델(principal stress model)을 생성하였다. 해석 시간을 고려하여 생성된 로어 암 모델은 실제 사이즈에서 45% 축소된 사이즈로 생성되었다.

Fig. 2와 같이 단방향 모델은 탄소섬유의 각도를 0/45/-45/90° 순서를 따라 총 18개 layer로 적층하였다. 주 응력 방향 모델은 Fig. 3과 같이 2D 유한요소해석을 통해 각각  $\pm X, \pm Y$ 축 방향의 하중이 작용할 때의 주 응력 분포를 바탕으로 탄소섬유를 배치 후 동일하게 18개 layer로 적층하였다. CFRP 로어 암의 유한요소모델은 2.2절에서 소개한 python code를 사용하여 생성되었다.

해석에 적용한 하중 방향 및 구속 조건은 Fig. 4와 같다. 로어 암의 구조 성능 평가에 작용되는 하중은 차량의 무게에 따라 결정된다. 따라서 컨트롤 암이 지지하는 차량의 무게의 4배인 4G의 하중을 X 방향으로 적용하였다. 모달 해석(modal analysis)은 구조 해석과 동일한 구속 조건을 적용하여 수행하였으며, 주파수 응답 해석(frequency analysis)

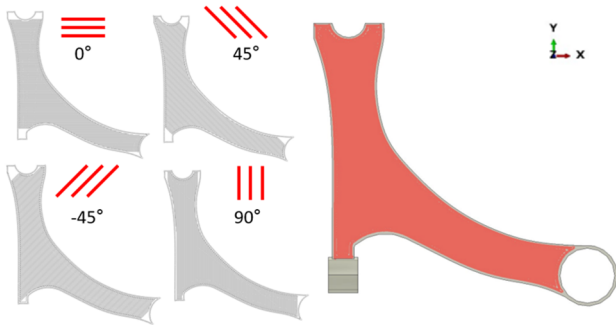


Fig. 2 Uniaxial model of CFRP lower control arm

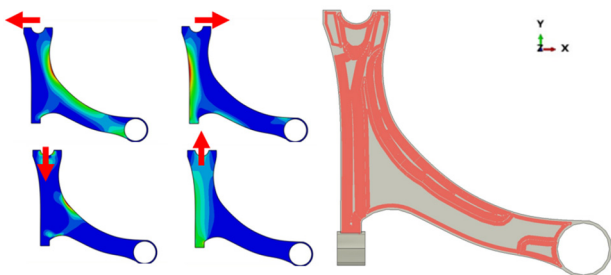


Fig. 3 Principal stress model of CFRP lower control arm

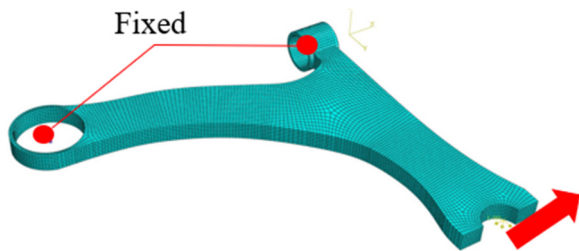


Fig. 4 FE model and boundary conditions of lower control arm

의 경우 Z축으로 unit 가진을 부여하였다.

CFRP 로어 암 유한요소해석 모델의 요소 종류는 matrix는 C3D8R을 적용하였으며 fibre는 B31을 적용하였다. Mesh convergence study를 수행하였으며, 다음과 같은 절점과 요소의 개수를 부여하였다: 알루미늄 모델(82,637개의 절점과 70,191개의 요소); 단방향 모델(287,094개의 절점, 277,616개의 요소); 주 응력 모델(261,920개의 절점, 251,217개의 요소).

일반적인 단섬유 모델은 prepreg 형식의 sheet 형태로 제작되며 열경화성 수지를 주로 사용한다. 하지만 3D 프린터를 사용하는 경우 열가소성 수지가 사용되며 prepreg 대비 복합재 대량생산에는 불리하지만 복잡한 형상, 탄소섬유의 간격, 적층 방향과 같은 복합재 디자인의 자유도를 크게 향상시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 3D 프린터로 제작되는 단방향 탄소섬유 로어 암 모델과 주 응

Table 1 Material properties of lower control arm

	Al	CCF (fibre)	PETG (matrix)
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.6	1.4	1.25
E (GPa)	70	149	1.472
$\nu$	0.33	0.26	0.39
T.S (MPa)	350	2,206	51

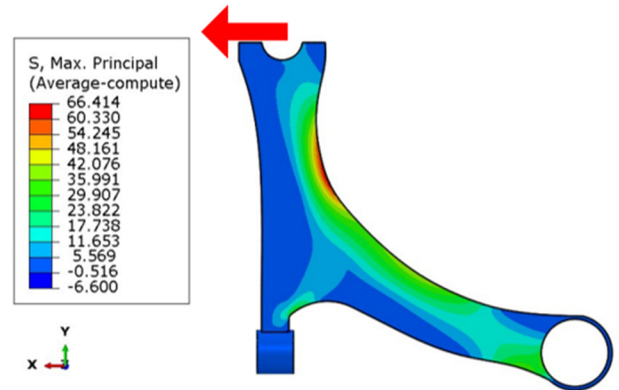


Fig. 5 Max. principal stress contour of the conventional model [MPa]

력 방향 로어 암 모델을 비교하였다. 전산 해석에 적용된 재료 물성은 Table 1에 명시하였다. 알루미늄의 경우 T.S 값을 항복 강도로 나타내었으며, CCF와 PETG 물성은 T.S 값을 나타낸다.

#### 4. 해석 결과

##### 4.1 구조 해석 결과

Fig. 5는 알루미늄 모델의 선형 탄성해석 결과이며 최대 주 응력은 항복강도(350 MPa)보다 낮은 66.41 MPa 발생하였다. Fig. 6은 CFRP 재료를 사용한 단방향 모델과 주 응력 모델의 선형 탄성 해석 결과이다.

Fig. 6(a)는 단방향 모델의 matrix에 발생하는 등가응력의 분포이며, 알루미늄 모델과 비교하여 최대 등가응력의 위치가 부쉬 쪽으로 이동하였다. Fig. 6(c)는 주 응력 모델의 matrix에 발생하는 등가응력의 분포이며 단방향 모델 대비 허용하중 용량이 28% 증가하였다. 두 개의 CFRP 모델의 fibre domain에서 발생하는 최대 주 응력 값은 거의 동일하나, 주 응력 모델은 단방향 모델 대비 탄소섬유 사용량이 34% 감소하였다.

Table 2는 알루미늄 모델, 단방향 모델, 그리고 주 응력 모델의 무게를 비교한 결과이다. 알루미늄 모델의 무게는 198 g이며, CFRP를 적용한 2개의 모델의 무게는 80 g으로 알루미늄 재료에 비해 60% 경량화되었다.

**Table 2** Mass of the lower control arm

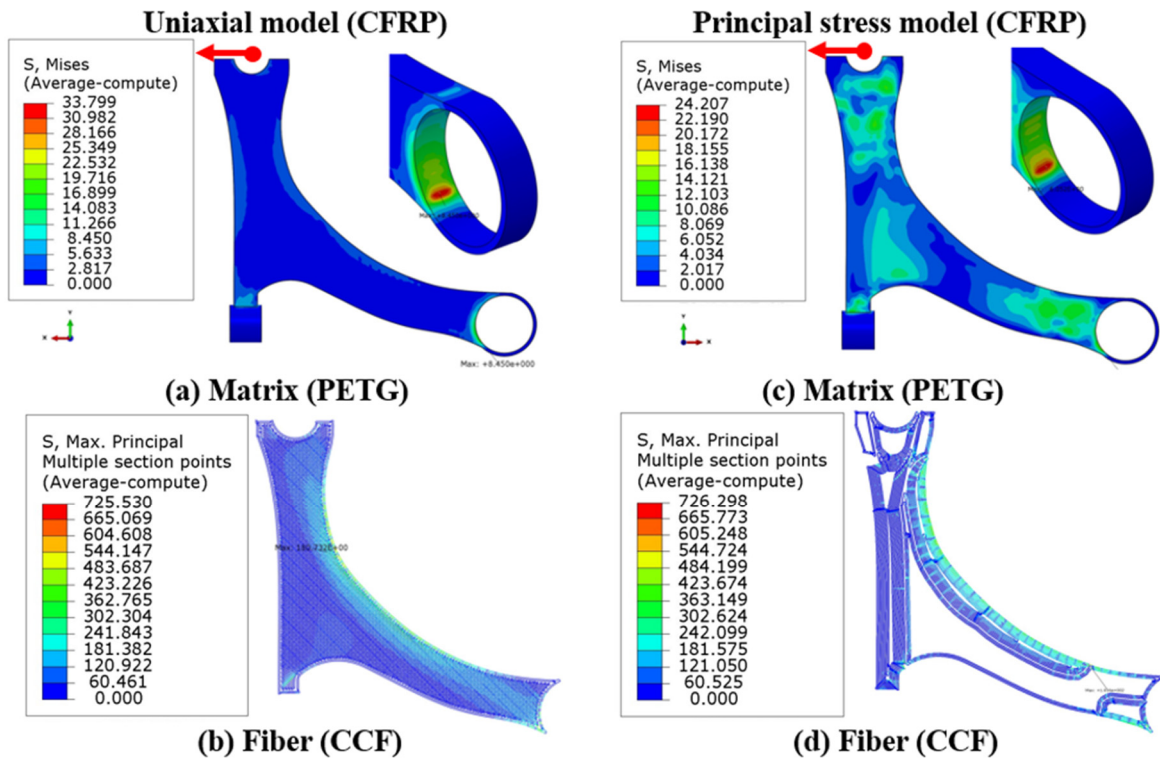
Mass (g)	Aluminum	Uniaxial (CFRP)	Principal (CFRP)
Total	198	80.1	79.9
Fibre		24.2	16.0

4.2 진동 해석 결과

Fig. 7은 알루미늄 모델, 단방향 모델, 주 응력 모델의 1차 ~ 3차 모달해석 결과이다. 모달 해석은 구조 해석 조건과 동일한 구속조건을 적용하여 수행되었다. 알루미늄 모델은 1, 2차 mode까지만 X

**Table 3** Natural frequencies and mode shapes of lower control arm

	Conventional model (Al)	Uniaxial model (CFRP)	Principal stress model (CFRP)
Mode 1	Frequency: 346 Hz	Frequency: 115 Hz	Frequency: 129 Hz
Mode 2	Frequency: 1542 Hz	Frequency: 523 Hz	Frequency: 595 Hz
Mode 3	Frequency: 2020 Hz	Frequency: 819 Hz	Frequency: 737 Hz



**Fig. 6** Structural analysis results [MPa]: (a) equivalent stress contour of uniaxial model matrix domain; (b) maximum principal stress contour of uniaxial model fibre domain; (c) equivalent stress contour of principal stress model matrix domain; (d) maximum principal stress contour of principal stress model fibre domain

축에 대한 굽힘 변형이 발생하나, CFRP 모델은 1, 2, 3차 모드 전부 X축에 대한 굽힘 변형이 나타난다. 이는 CFRP 재료의 플라스틱 matrix 소재 특성상 알루미늄 보다 굽힘 하중에 대한 강성이 상대적으로 약하기 때문인 것으로 판단된다.

1차 모드 고유진동수는 알루미늄 모델은 346 Hz, 단방향 모델은 115 Hz 그리고 주 응력 모델은 129 Hz이다. CFRP 적용시 알루미늄 재료 사용에 비해 고유 진동수가 감소함을 확인하였다. 단방향 모델과 주 응력 모델은 거의 동일한 무게와 강성을 가지지만 섬유 배치에 따라 고유진동수의 차이를 보인다.

Fig. 7(a)는 3가지 모델에 Z축으로 unit 가진을 부여한 주파수 응답 해석에 따른 가속도 응답 결과이다. 단방향 모델이 가장 낮은 가속도 응답을

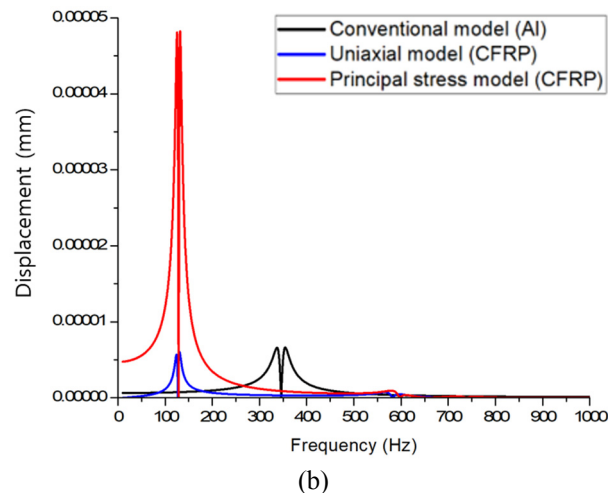
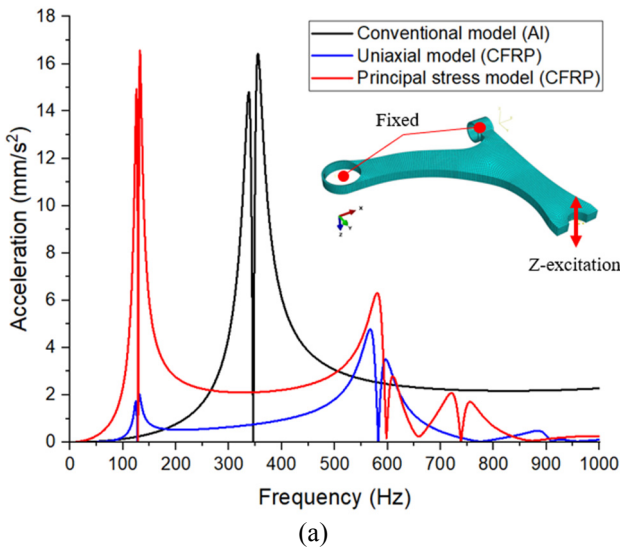


Fig. 7 Frequency response analysis result of lower control arm: (a) acceleration response; (b) displacement response

보이고 주 응력 모델은 균일하지 않은 섬유배치로 인해 단방향 모델보다 높은 가속도 응답을 보이나, 알루미늄 모델과 비교할 경우 거의 동일한 가속도 응답을 가진다. 실제 차량이 운행될 때 도로 노면에서 발생하는 최대 주파수는 50 Hz로 보고되고 있으며<sup>(19,20)</sup>, 3가지 로어 암 모델 모두 노면 진동에 의한 공진은 발생하지 않을 것으로 추정된다.

Fig. 7(b)는 3가지 모델의 Z축으로 unit 가진을 부여하였을 때 발생하는 변형량 응답 시뮬레이션 결과이다. 차량 운행 중 발생하는 실제 가진 데이터 확보가 어려워 unit 가진만 부여하여 진동 경향성만 평가하였다. 단방향 모델은 알루미늄 모델 대비 낮은 주파수에서 낮은 변형량이 예측되었다. 그러나, 3가지 모델 중 주 응력 모델에서 가장 큰 변형이 발생하였다. 주 응력 모델의 경우 다른 모델 대비 탄소섬유 재료 배치의 불균형이 가장 크며, 이러한 배치 불균형이 동적 특성 저하를 야기하는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 로어 암 주변에 진동 특성 향상을 위해 설치되는 고무 부쉬 등 다른 장치와의 결합은 고려되지 않았다. 따라서 후속연구를 통해 앞서 언급한 한계점 등이 고려된 CFRP 적용 로어 암의 진동 특성평가 수행이 요구된다.

본 연구의 진동해석 결과를 통해 CFRP를 적용한 로어 암의 경우 알루미늄 모델 대비 고유진동수가 감소하며, 탄소 섬유 배열에 따라 주파수 응답 또한 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 CFRP 복합재료를 사용하여 로어 암을 제작하는 경우 이러한 진동 특성을 고려해서 최적 설계를 수행해야 한다.

## 5. 결론

본 연구는 3D 프린팅을 활용하여 제작되는 CFRP 로어 컨트롤 암의 구조, 진동 특성을 유한요소해석을 통해 분석하였고 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- G-code를 활용한 CFRP 복합재료 유한요소모델 생성 자동 생성 python code 개발을 통해 해석 전 처리과정을 크게 단축하였다.
- 구조 해석 결과 자동차 로어 컨트롤 암에 CFRP 재료 적용시 상용 모델 보다 구조의 허용하중 이내에서 60% 경량화하였다. 또한 주 응력 모델은 단방향 모델에 비해 동일한 강도에서 탄소 섬유 사용량이 34% 감소하였다.
- 진동 해석 결과 CFRP 적용 시 상용 모델에 비해 고유진동수가 감소하지만 주파수에 따른

가속도 응답 또한 감소하는 특성을 보였다.

CFRP 복합재료의 유한요소해석 접근법에 대한 구조적인 검증은 다양한 선행연구에서 시험을 통해 이루어졌다. 하지만 진동해석에 대한 시험적인 검증이 여전히 부족하다. 본 연구에서는 실제 크기의 45% 축소된 모델을 사용하였고, 주파수 응답 해석 시 경향성 비교를 위해 실제 가진 상황이 아닌 unit 가진을 부여하였다. 이러한 한계점들은 후속 연구를 통해 추가적인 진동특성 평가가 요구된다. 그러나 본 연구결과는 선행 연구로써 CFRP의 적용 가능성과 섬유 배치에 따른 구조, 진동 특성의 경향을 파악하는 데 유용한 통찰력을 제공한다.

## 후 기

본 논문은 2023년 대한기계학회 본부학술대회에서 발표된 연구내용 및 논문의 주저자 박거락 학생의 석사논문연구 “Study on Mechanical Behaviour of 3D Printed Continuous Carbon Fibre Reinforced Plastics with Principal Stress Fibre Path”(지도교수 조락균) 내용 중 일부를 바탕으로 작성되었습니다.

## 참고문헌

(References)

- (1) Soutis, C., 2005, “Fibre Reinforced Composites in Aircraft Construction,” *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 41, No. 2, pp. 143~151.
- (2) Mei, H., Ali, Z., Ali, I. and Cheng, L., 2019, “Tailoring Strength and Modulus by 3D Printing Different Continuous Fibers and Filled Structures into Composites,” *Advanced Composites and Hybrid Materials*, Vol. 2, pp. 312~319.
- (3) Xu, Y., Gao, Y., Wu, C., Fang, J., Sun, G., Steven, G. P. and Li, Q., 2021, “On Design of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Laminated Structure with Different Failure Criteria,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 196, Article 106251.
- (4) Lee, Y. S., Shin, K. H., Cheong, S. K. and Choi, U. J., 2013, “Utilization of Finite Element Analysis in the Design and Performance Evaluation of CFRP Bicycle Frames,” *Transactions of the KSME A*, Vol. 37, No. 1, pp. 121~127.
- (5) Kim, J. H., Bang, J. M. and Kim, J. H., 2011, “The Study of Simulation Dynamic Behavior of CFRP Structural Members,” *Transactions of the KSME A*, Vol. 35, No. 5, pp. 561~565.
- (6) Cheng, P., Peng, Y., Li, S., Rao, Y., Duigou, A. L., Wang, K. and Ahzi, S., 2023, “3D Printed Continuous Fiber Reinforced Composite Lightweight Structures: A Review and Outlook,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 250, Article 110450.
- (7) Tian, X., Todoroki, A., Liu, T., Wu, L., Hou, Z., Ueda, M., Hirano, Y., Matsuzaki, R., Mizukami, K., Iizuka, K., Malakhov, A. V., Polilov, A. N., Li, D. and Lu, B., 2022, “3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Polymer Composites: Development, Application, and Prospective,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers I*, Vol. 1, No. 1, Article 100016.
- (8) Almeida, J. H. S., Bittrich, L. and Spickenheuer, A., 2020, “Improving the Open-Hole Tension Characteristics with Variable-Axial Composite laminates: Optimization, Progressive Damage Modeling and Experimental Observations,” *Composites Science and Technology*, Vol. 185, Article 107889.
- (9) Avanzini, A., Battini, D. and Giorleo, L., 2022, “Finite Element Modelling of 3D Printed Continuous Carbon Fiber Composites: Embedded Elements Technique and Experimental Validation,” *Composite Structures*, Vol. 292, Article 115631.
- (10) Zhang, H., Yang, D. M. and Sheng, Y., 2018, “Performance-Driven 3D Printing of Continuous Curved Carbon Fibre Reinforced Polymer Composites: A Preliminary Numerical Study,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 151, pp. 256~264.
- (11) Malakhov, A. V. and Polilov, A. N., 2016, “Design of Composite Structures Reinforced Curvilinear Fibres Using FEM,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 87, pp. 23~28.
- (12) Park, G. R., Cho, N. K., Lee, Y. J. and Kim, C. S., 2023, “Comprehensive Parametric Analyses on the Mechanical Performance of 3D Printed Continuous Carbon Fibre Reinforced Plastic,” *Composite Structures*, Vol. 329, Article 117804.
- (13) Lym, J. H., Doh, J. H., Yoo, S. H., Kang, O. S. and Kang, K. W., 2016, “Sizing Optimization of CFRP Lower Control Arm Considering Strength and Stiffness Conditions,” *Proceedings of KSAE 2016 Annual Spring Conference*, Vol. 21, No. 4, pp. 389~396.
- (14) 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: Engineering*, Vol. 58, pp. 400~407.
- (15) Jang, J. I., Lee, J. S. and Lym, J. H., 2017, “Durability Assessment of CFRP Lower Control Arm Using Stress-Life Method,” *Transactions of the KSME A*, Vol. 41, No. 11, pp. 1131~1137.
- (16) Shingare, K. and Naskar, S., 2021, “Probing the Prediction of Effective Properties for Composite Materials,” *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Vol. 87, Article 104228.

- (17) Weng, L., Fan, T., Wen, M. and Shen, Y., 2019, "Three-Dimensional Multi-Particle FE Model and Effects of Interface Damage, Particle Size and Morphology on Tensile Behavior of Particle Reinforced Composites," *Composite Structures*, Vol. 209, pp. 590~605.
- (18) Zhou, Y., Sun, Y. and Huang, T., 2019, "SPH-FEM Design of Laminated Plies under Bird-Strike Impact," *Aerospace*, Vol. 6, No. 10, Article 112.
- (19) Sohn, D. S., Lee, J. H. and Ryu, S. W., 2018, *Research of Driving Comfort to Analysis the Cause of the Vibration of the Pavement*, Expressway and Transportation Research Institute, Hwaseong, Republic of Korea, pp. 1~217.
- (20) Kim, K. S., 2009, "Generation of Three Dimensional Road Surface Profiles with Considering Coherence Relation," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 10, No. 5, pp. 917~922.