<응용논문> **DOI https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.11.1131** ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

응력수명법을 이용한 탄소섬유강화복합재 로어 컨트롤 아암의 내구성 평가

장재익* · 임주희*† · 이종수*
* 연세대학교 기계공학부

Durability Assessment of CFRP Lower Control Arm Using Stress-Life Method

Jaeik Jang*, Juhee Lim*† and Jongsoo Lee*
* School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

(Received July 5, 2017 ; Revised August 23, 2017 ; Accepted August 23, 2017)

Key Words: Lower Control Arm(로어 컨트롤 아암), Structure Analysis(구조 해석), Durability Assessment(내구성 평가), Composite Material(복합재료), Finite Element Analysis(유한요소해석), Stress-Life Method(응력수명법)

초록: 최근 자동차 분야에서의 CO_2 배출 및 연비에 대한 규제가 강화되고 있다. 이에 따라 여러 기업들은 차체 및 차량부품에 복합재료를 적용하여 경량화를 이루고 연비향상을 통해 규제를 만족하고자 한다. 특히 현가파트 중 강한 하중을 받는 로어 컨트롤 아암의 경우, 운전조건을 만족하기 위해 대부분 두껍고 무겁게 설계된다. 따라서, 로어 컨트롤 아암의 경량화 및 그에 따른 내구성평가가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 먼저 유한요소해석을 통해 하중조건에 따른 강도 및 강성 해석 값이 경계조건을 만족하는지 확인하기 위하여 구조해석을 수행하였다. 해석 과정에는 주응력 값을 기준으로 평가하고 관성제거기법을 적용하였다. 또한, 이를 바탕으로 응력-수명법을 이용하여 내구성평가를 실시하였다.

Abstract: Recently, regulations on fuel efficiency and CO_2 emissions have been reinforced in automobile industries. As a result, many companies make an effort to satisfy these regulations by adapting composite materials to the automobile body as well as its components. In particular, the lower control arm in the suspension system is subjected to heavy loads and is designed to be thick to meet operating loads. Therefore, it is essential for the lower control arm to reduce weight and to secure the durability assessment. In this paper, we conducted structural analysis by performing stress and stiffness analysis under given load conditions through finite element analysis, and verified whether it satisfies the load and stiffness conditions. The inertia relief method is adapted to the process of analysis, and the principal stress is used as a criterion for evaluation. Based on these results, the durability assessment is carried out using the stress-life method.

- 기호설명 -

ρ : 밀도
σ_u : 인장강도
E : 세로탄성계수 또는 영률
ν : 푸아송 비
ε : 변형률
$\Delta\sigma_0$: 등가응력 범위
σ_m : 한 사이클 당 평균 응력
$\Delta\sigma$: 한 사이클 당 응력 범위
$\frac{\sigma'f}{E}$: 피로강도계수
b : 피로강도지수
$\varepsilon'f$: 피로연성계수
c : 피로연성지수
N_f : 피로수명

† Corresponding Author, juheelim@yonsei.ac.kr
ⓒ 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

최근 미국, 중국, 유럽 등 주요 국가들에서는 자동차 산업에 있어 CO_2 가스배출 및 연비에 관한

규제가 계속하여 강화되는 추세이다. 이러한 상황 속에서 각 국의 여러 기업들은 자동차 경량화를 통해 이러한 규제를 만족하기 위한 연구를 진행하고 있다.

탄소섬유강화 플라스틱의 경우 알루미늄에 비해 가볍고 강도가 5배 정도 강하다. 이러한 성질 때문에 탄소섬유를 적용한 제품 개발이 증가하였다.[1] 그 결과, 항공분야에서 주로 사용되던 복합재료는 자동차 산업분야에서도 사용량이 급격히 증가하여 금속재를 대체하고 있다. BMW 사와 같은 경우 M 시리즈의 루프와 범퍼, I 시리즈의 패신저 셀, 루프, 후드 부, 그리고 7 시리즈의 A/B/C 필러에 적용하고 있고, TOYOTA 사의 경우 Lexus LFA의 차량실내에 적용하고 있다. 또한, Audi 사는 R8 Spyder의 B 필러와 스페이스 프레임, Daimler-Chrysler사에서는 후부 리드 내 측면에 각각 적용하고 있음을 알 수 있다.

현가장치 파트들은 강한 하중을 받아 파괴가 빈번하게 일어난다. 그 중 로어 컨트롤 아암(Lower Control Arm, LCA)은 운전조건 만족을 위해 대체로 두껍고 무겁게 설계되는데, 그에 따라 차량경량화를 위해서 고려되는 파트 중 하나로 손꼽힌다. 또한, 코너링 시 커다란 범프 및 제동력을 받아 하중조건에서 취약한 파트로 여겨져 경량화와 동시에 하중조건을 견디기 위한 충분한 강성이 요구된다.[2,3] 또한, 재료에 반복적인 하중이 가해지고 그 반복횟수가 늘어나는 경우 피로파괴 현상에 의해 정적 인장강도보다 훨씬 낮은 응력에서도 파괴가 발생한다. 대부분의 구조물 및 기계는 반복 또는 변동하중을 받으면서 장시간 사용되기 때문에 대부분 정적 하중에 의한 파괴가 아닌 반복 및 변동하중에 의한 피로파괴가 지배적이다.[4] 그러므로 섬유강화 복합재를 사용한 기계구조물의 내구성을 확보하기 위해서는 이에 대한 피로해석 및 내구성 평가가 필요하다.

Park 등[5]의 연구결과에서는 알루미늄 컨트롤 아암 개발과정에서 실차 하중을 이용한 해석적인 방법에 의해 강도해석과 내구해석을 진행하였으며, 컨트롤 아암의 강도해석과 내구해석에는 동일한 유한요소모델을 사용하였다. 이후 피로 균열 개시 방법을 이용한 대하중 조건에 의한 강도해석은 부시의 억지 끼움 맞춤에 의해 컨트롤 아암에 나타나는 후프 응력의 영향을 고려한 후 각 조인트 부에 하중을 적용시켜 진행하였다.

Kong 등[6]의 연구에서는 기존 스틸 소재의 로어 컨트롤 아암의 경량화를 위해 탄소섬유강화플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)소재를 적용하였다. Tsai-Wu 파괴기준으로 적층 복합재 구조물의 안전성을 판단한 후 일반적 적층 쉘로 구성된 유한요소모델로의 관성제거 기법 적용을 통해 복합재 구조의 안전성을 확보 할 수 있도록 적층 플라이 수를 최적화하였다.

Park 등[7]의 연구결과에서는 CFRP를 이용하여 피로시험을 실시하고 그것으로부터 발생하는 손상을 해석하였다. Mao,[8] Abdelal 등[9]이 제안한 모델들을 통해 피로손상누적 곡선을 획득하고 이를 통해 손상을 예측하였다.

본 논문에서는 복합 재료 소재를 적용한 로어 컨트롤 아암의 구조해석 및 내구성 평가에 대해 알아보고자 한다. 이를 위해 로어 컨트롤 아암의 구속조건을 수립하고, 재질 특성에 대해 정립하였다. 이후 39가지의 하중조건에 대한 강도 및 강성 해석을 실시하였고 구속조건 및 제한조건과 비교하였다. 또한, 이러한 해석 결과 값을 바탕으로 응력-수명법을 통하여 내구성평가를 수행하였다.

2. 구조 해석

2.1 유한요소모델

먼저, CFRP를 적용한 로어 컨트롤 아암 모델은 기존에 수행된 Lim 등[10]의 연구에서 강도 및 강성 조건을 고려하여 위상최적설계한 형상을 이용하며 Fig. 1과 같다. 이 모델은 솔리드 형태의 기하형상과 표면의 두께가 아주 얇은 요소 표면으로 이루어져 있다. 표면을 쉘 요소로 구성한 것은 피로해석 시 표면에서의 응력분포를 이용하기 위함이다. 메쉬 형상은 C3D10 메쉬 타입을 사용하여 고차 요소로 구성하였고 총 요소 수는 대략 10만 개 정도이다. 본 연구에서는 강도 및 강성 해석에 있어 같은 유한요소모델을 사용하였다.

2.2 CFRP재료 특성

CFRP는 카본 섬유와 플라스틱 수지를 혼합하여 만들어진다. 본 연구에서는 TORAY사의 T300 탄

Fig. 1 Finite element model of CFRP LCA

Table 1 Properties of T300/PEEK

Properties \ Types	Carbon fiber	PEEK resin
Model	T300-3000	APC-2/AS4
Density[kg/m^3]	1.75e3	1.6e3
Tension strength [GPa]	3.53	2.13
Elastic Modulus [GPa]	230	134
Possion's ratio	0.2	0.38

Table 2 Material properties of laminated CFRP

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)
56.818	56.818	9.091
G_{12} (GPa)	G_{23} (GPa)	G_{31} (GPa)
21.447	2.399	2.399
ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}
0.324	0.318	0.051

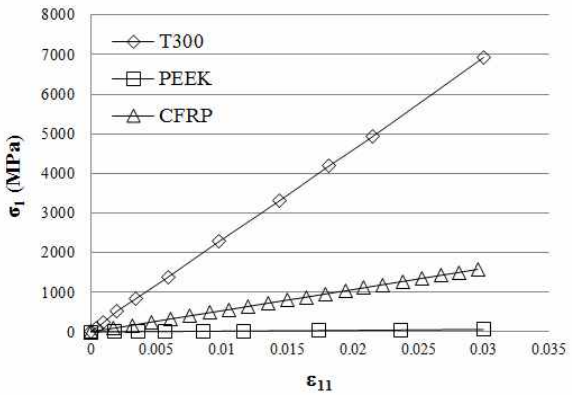


Fig. 2 Stress-strain curves of each material

소 섬유와 HWA S. Fiber 사의 PEEK plastic resin을 혼합하여 만든 T300/PEEK CFRP를 사용하였다. 탄소섬유와 플라스틱 수지에 대한 기본 물성치는 Table 1과 같다. 탄소섬유의 체적비는 0.68로 하였다.

탄소섬유를 이용한 복합재료의 경우에는 섬유 방향 및 직경방향에 따라 강도 특성이 커다란 차이를 보이는 이방성을 띄게 된다. 섬유배열 방향의 인장, 굽힘 및 압축특성은 섬유의 강도와 탄성률에 의해 결정되며, 직각방향에서의 인장, 굽힘, 압축 및 전단특성은 주로 수소 및 계면이 지배인자가 된다. 따라서, 섬유 배열 방향의 인장강도와 탄성률은 대체적으로 섬유의 인장강도 및 탄성률에 섬유의 체적 함유율을 더한 값으로 나타나며, 직각 방향의 특성은 거의 수지가 결정한다.[11]

각 재료 선정 후 적층 각도 및 방향에 따른 물성치를 산출하였다. Mori-Tanaka 평균장 이론을 이용하여 등가물성치를 예측하였으며, 이는 모재 속의 탄소섬유가 규칙적으로 배열된 것으로 가정하고 단위 격자에 균질화 기법을 적용한 것이다.[12] 적층 구조는 $[0/90/45/-45]_s$와 같으며, 구조물의 전체 두께가 20 *mm* 임에 따라 각 층을 2.5 *mm* 로 동일하게 가정하였다. 이 경우의 물성치는 강성행렬의 역행렬을 계산하여 Table 2와 같이 정리하였다. 또한, 각각의 재료 및 적층하였을 때의 응력-변형률 선도를 Fig. 2에 나타내었다.

2.3 하중조건 및 경계조건

주어진 하중조건에 따라 Hypermesh[13]를 이용하여 응력해석을 진행하였으며, 먼저 front bush와 rear bush의 중심 사이는 MPC 요소(REB 3)을 통해 하중을 공유하게 하였다. 이후 ball joint, front bush, rear bush의 중심에 각각의 하중조건에 따른 X, Y, Z 방향으로의 힘을 가하고 추가적으로 front bush 및 rear bush 에는 모멘트를 가하였다.

강성해석 조건의 경우에는 각 bush 파트 중앙에 절점을 생성하고 강체 요소로 묶어 변위를 공유하도록 하였다. Front bush의 절점은 3축 모든 방향으로 구속되며 rear bush는 X 방향으로만 변위가 존재한다. Ball joint의 절점은 Z 방향으로만 구속을 한 뒤 X, Y 방향으로는 각각 1 *kN* 을 가하였다.[14] 이에 대해 경계조건으로써 ball joint 부분의 절점에서 해석한 값 기준으로 X 방향은 2.5 kN/mm 이상, Y 방향으로는 50 kN/mm 이상을 만족해야 한다.[15] 이는 두 bush 부분은 차체 프레임에 연결되고 ball joint 부분이 바퀴가 노면으로부터 받는 힘에 영향을 받기 때문이다. 강도해석의 경우 경계조건의 안전계수를 1.5로 설정하여 주응력이 400 *MPa* 이하를 만족해야 한다.

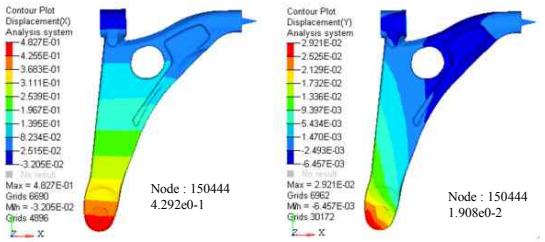
본 연구에서는 하중조건을 이용한 유한요소해석을 실시하는데 구속조건이 필요 없는 관성제거기법(inertia relief analysis)을 이용하였다. 관성제거해석은 강체 운동을 하고 있는 구조를 해석할 때 쓰이는 방법으로써 외력이 결정되어 있으나 강체운동을 구속할 변위 경계조건이 주어지지 않는 경우에 적합하다.[16]

2.4 유한요소 해석결과

강성해석의 경우 1 *kN*을 X, Y 방향으로 가해주었기에 아래 ball joint부의 중심 절점에서의 값의 역수가 강성을 나타냄을 알 수 있다. 그 결과 X 방향의 경우 2.33 kN/mm으로 기준값에 다소 못 미치는 값으로 나타나며, Y 방향으로는 52.63 kN/mm으로 조건을 충족시킴을 확인할 수 있다. 이러한 강성해석 조건에 따른 변위의 변화값은 Fig. 3과 같이 나타난다. X 방향 강성의 경우에는

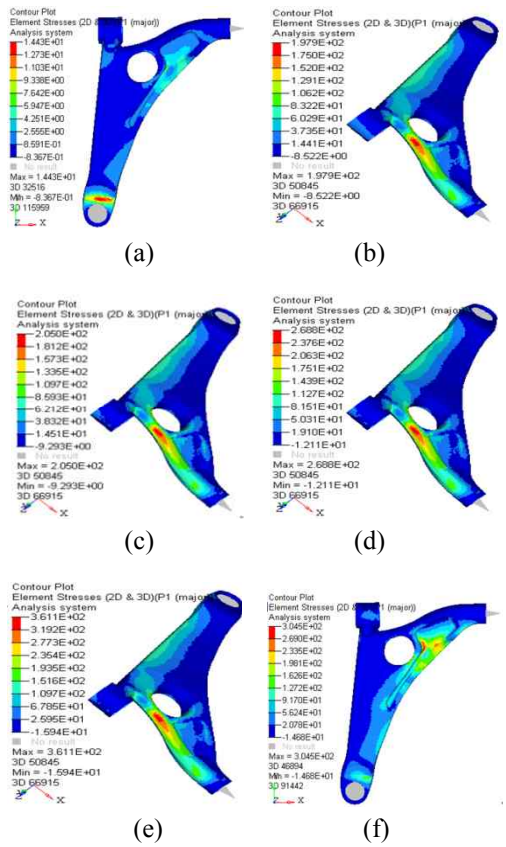
Table 3 Results of inertia relief analysis: Max. principal stress

Subcase	GVW	Forward impact	Forward braking#1
Stress (MPa)	14.43	197.9	205.0
Subcase	Forward braking#3	Forward braking#4	Reverse braking #3
Stress (MPa)	268.8	361.1	304.5



(a) (b)

Fig. 3 Results of stiffness analysis (a) X-direction (b) Y-direction



(a) (b) (c) (d) (e) (f)

Fig. 4 Results of inertia relief analysis: (a) GVW, (b) Forward impact, (c) Forward braking #1, (d) Forward braking #3, (e) Forward braking #4, (f) Reverse braking

본 연구에 사용된 복합재 적층 구조의 동일 각도 및 총 두께에서 각 층의 두께만을 최적화함으로써도 제한조건을 만족 가능함을 확인하였다.[10]

강도해석의 경우 일반적으로 고려되는 총 39가지의 하중조건 중 가해지는 평균 힘이 10,000 N 이상인 것과 평균 모멘트가 40,000 $N \cdot mm$ 이상인 조건 12가지를 선정하여 관성제거해석을 수행하였다. 이에 forward/reverse braking과 같은 전후방 브레이크 시 가해지는 하중조건이 다수 포함되었으며, 해당 속도에 따라 각각 4단계 및 3 단계로 구분하여 분류하였다. 또한 기준 속도에서의 전방 충돌 시 발생하는 하중값을 나타내는 forward impact 및 1 G 에서의 차체 총중량(Gross Vehicle Weight, GVW)을 고려한 경우도 포함하였다.

이로부터 높은 수준의 응력이 발생한 하중조건의 경우에 대한 결과를 Table 3과 Fig. 4에 정리하였다. 아래 결과들을 통해 최대 주응력 값들은 모두 400 MPa 의 기준을 넘지 않은 것을 알 수 있었다.

3. 내구성평가

3.1 내구해석

복합재료의 경우 Reifsnider 등[17]의 연구내용에서 피로 손상이 비선형적으로 증가함을 실험적으로 확인할 수 있다. 특히 초기에는 모재에 균열이 발생하다가 어느 일정 부분이 지나면 기지간의 박리 등이 나타나고 순차적인 섬유 파단에 의해 최종적으로 재료의 파단이 발생하는 양상을 보인다.

일반적으로 내구해석은 동적 내구해석과 준정적 내구해석으로 나뉜다. 준정적 내구해석 방법은 시스템에 동하중이 가해지는 방향으로 단위하중을 가하여 나타나는 변형률을 계산한다. 그 후에 시스템에 가해지는 동하중 이력을 적용하여 선형 중첩의 개념으로 동응력을 계산한다. 본 연구는 등가하중을 사용하여 정적 구조해석을 한 후 일정 진폭의 하중이력을 적용하여 피로수명을 예측하기 위해 준정적 내구해석을 사용하였다.

피로수명을 예측하는 방법으로는 일반적으로 응력-수명법과 변형률-수명법이 있으며, 피로수명을 평가하기 위해선 피로시험을 통해 피로 물성값을 구해야 한다. 이러한 시험에는 부품단위 피로시험과 재료단위 피로시험이 있는데, 대상체가 달라지더라도 재료가 동일하면 정량적인 피로수명이 가능한 재료단위 피로시험을 주로 사용한다. 하지만, 이러한 방법은 대상 부품의 피로수명 영향 인

자를 정확하게 고려하지 않으면 정확도가 낮아질 수 있다.

응력-수명법은 대상체에 작용하는 응력범위가 주로 재료의 탄성 영역 내에 있거나 10^3~10^4 cycles 이상의 고주기 수명평가의 경우 합리적으로 사용할 수 있다. 하지만 소성변형이 고려되지 않기 때문에 저주기 수명평가에선 적용이 적합하지 않으며 일정한 교번하중(alternating load)이 아닌 초기균열에 관여하는 소성변형을 유발하는 하중이 포함된 변동하중에 대해서도 적용되기에는 부적합한 측면도 있다.[18] 보통 단수명과 장수명 사이의 구분은 사용재료에 따라 결정되지만 보통 10~10^5 cycles 사이에서 구분된다. 대부분의 응력-수명법 선도 데이터는 교번 하중에 의해 결정되므로 평균응력 값은 0이라는 조건을 가진다. 그러므로 실제 응력의 값을 계산하여 나타낼 수 있는 평균응력 계산이 필요하다. 따라서 평균응력의 영향을 고려하기 위하여 Goodman equation을 사용하였으며, 해당 correction은 수식 (1)과 같이 계산된다.

$$\Delta\sigma_0 = [(1-\frac{\sigma_m}{\sigma_u})/\Delta\sigma]^{-1} \quad (1)$$

변형률-수명법은 대상체 형상의 위험 부위인 노치에서 발생하는 재료의 반응이 대상체의 변형률과 변위에 의존한다는 관찰에 근거를 두고 있다.[19] 변형률-수명법은 시편을 이용하여 변형률 제어로 진행된 피로시험이 대상체의 노치에서 발생하는 피로파괴 현상을 묘사할 수 있다고 가정한다. 즉, 노치에서 발생하는 피로손상은 시편과 대상체가 동일한 응력-변형률 이력이 적용될 때 발생하는 피로손상과 같다고 가정하는 것이다. 결과적으로 높은 하중범위에서의 반복응력-변형률 반응과 재료의 거동은 변형률 제어 조건하에서 가장 모델화가 잘된다고 볼 수 있다. 최종 변형률-수명 관계식은 수식 (2)와 같으며 ε-N 선도는 Fig. 5와 같이 나타난다.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f^{'}}{E}(2N_f)^b + \varepsilon_f^{'}(2N_f)^c \quad (2)$$

본 논문에서는 우선적으로 응력-수명법과 변형률-수명법 중 고주기 수명평가에 대해 내구해석을 진행하기 위해 응력-수명법을 적용하였다. Fig. 6은 본 연구에서 사용된 $[0/90/45/-45]_s$ T300/PEEK CFRP에 대해 일정진폭 하중 하의 실험을 통해 얻은 일련의 피로물성(응력-수명 선도)을 나타내고 있다.[20]

Table 4 Results of fatigue strength by stress-life method

Load case	Max damage (%)	Worst life repeats
Forward braking #3	6.456e-8	1.549e7
Forward braking#4	8.568e-7	1.167e6
Reverse braking #3	3.987e-7	2.508e6

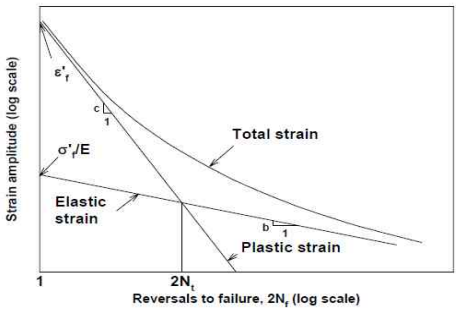


Fig. 5 ε-N curve

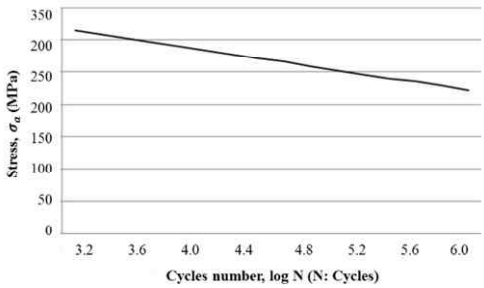


Fig. 6 S-N curve of $[0/90/45/-45]_s$ CFRP

3.2 내구해석 결과

유한요소해석을 통해 구조물의 피로수명을 예측하기 위해서는 응력-수명 선도뿐만 아니라 피로수명 예측 모델이 필요하다. 이에 데미지 값을 기준으로 판단하였으며, 설계 수명을 사용 가능 수명으로 나눈 값으로써 그 값이 1일 때 피로파괴가 발생한다고 추정할 수 있다.

내구해석 결과값 중 최대 수명 사이클 값이 작은 3가지의 경우를 Table 4에 정리하였다. 그 외의 나머지 하중 조건에 따른 내구해석 결과들은 영향이 미미하게 나타난다.

5. 결 론

본 연구에서는 T300/PEEK CFRP 소재를 적용한 로어 컨트롤 아암을 대상으로 강도해석 및 내구성 해석을 수행하였다. 복합재료는 $[0/90/45/-45]_s$ 구조에 2.5 *mm* 의 동일 두께 층으로 적층하였으며

Mori-Tanaka의 평균장 이론을 이용하여 등가물성치를 적용하였다.

또한 이러한 적층 구조에 해당하는 응력-수명 선도 실험값을 적용함으로써 해석의 신뢰도를 높였다. 먼저, 관성제거 기법을 사용하여 총 39가지 하중조건에 대한 강도해석 및 ball joint 중심부를 기준으로 X, Y방향의 강성해석을 수행하였다. 이 결과를 바탕으로 응력-수명법을 이용하여 준정적 내구해석을 진행하였다. 그 결과 Forward braking #4의 경우에 8.568e-7%의 최대 데미지를 나타내었으며, 나머지 값의 경우 미미한 영향을 보인다.

본 연구는 준정적 해석방법만을 고려하여 최적해를 산출한 것으로 향후 동적 내구해석을 이용한 해석방법을 통한 검증이 필요하다. 그리고 X방향의 강성해석 결과가 경계조건을 만족하지 못하였기 때문에 적층 방향과 두께 등에 대해 최적설계를 진행할 예정이며, 그에 따른 응력-수명 선도가 요구된다. 또한, 본 연구는 응력-수명법을 통한 내구해석을 진행하였으며, 향후 노치부에서의 응력집중 현상에 의해 소성변형이 유발되는 것을 고려하기 위해서는 변형률-수명법을 통한 내구해석이 요구된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받은 에너지기술개발사업(20163030024420)과 한국연구재단의 지원을 받은 중견연구자지원사업(2017R1A2B4009606)의 일환으로 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌
(References)

(1) Jacob, A., 2010, “BMW Counts on Carbon Fiber for its Megacity Vehicle,” *Reinforced plastics*, pp. 38~41.

(2) Lee, D. H. and Park, Y. C., 2003, “Multi-objective Optimization of Lower Control Arm Considering the Stability for Weight Reduction,” *The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 11, No. 4, pp. 94~101.

(3) Jung, Y. S., Na, J. H., Min, S. J. and Kim, Y. S., 2013, “Multi-Performance Structural Optimization of a Lower Control Arm for Weight Reduction,” *Proceeding of the Korean Society of Automotive Engineers*, No. 5, pp. 1290~1292.

(4) Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., 1989, “Fundamentals of Metal Fatigue Analysis,” Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

(5) Park, J. H., Son, K. R. and Park, I. H., 2014, “Improvement of Durability for Aluminum Control Arm by Fatigue Analysis under Vehicle Load Condition,” *Proceeding of the Korean Society of Automotive Engineers*, No. 5, pp. 427~432.

(6) 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 Korean Society of Automotive Engineers*, pp. 23~37.

(7) Park, H. S. and Choi, J. H., Koo, J. M. and Seok, C. S., 2010, “Fatigue Damage Evaluation of Woven Carbon-Fiber-Reinforced Composite Materials by Using Fatigue Damage Model,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 6, pp. 757~762.

(8) Mao, H. and Mahadevan, S., 2002, “Fatigue Damage Modelling of Composite Materials,” *Composite Structures*, Vol. 58, pp. 405~410.

(9) Abdelal, G. F., Cacers, A. and Barbero, E. J., 2002, “A Micro-Mechanics Damage Approach for Fatigue of Composite Materials,” *Composite Structures*, Vol. 56, pp. 413~422.

(10) Lim, J., Doh, J., Yoo, S. H., Kang, O., Kang, K. and Lee, J., 2016, “Sizing Optimization of CFRP Lower Control Arm Considering Strength and Stiffness Conditions,” *Korean Journal of Computational Design and Engineering,* Vol. 21, No. 4, pp. 389~396.

(11) Khan, S. U., Munir, A., Hussian, R. and Kim, J. K., 2010, “Fatigue Damage Behaviors of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites Contacting Nanoclay,” *Composite Science and Technology*, Vol. 70, No. 14, pp. 2077~2085.

(12) Mori, T. and Tanaka, T., 1973, “Average Stress in the Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions,” *Acta Metallurgica,* Vol. 21, No. 5, pp. 571~574.

(13) HyperMesh User Guide, HyperMesh Version 11.0, Altair Engineering Inc., Troy, MI, 2012.

(14) Nithin, K. and Veeresha, R., 2013, “Analysis of Front Suspension Lower Control Arm of an Automobile Vehicle,” *International Journal of Science and Research*, Vol. 2, pp. 51~56.

(15) Heo, S. J., Kang, D. O., Lee, J. H., Lee, 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*, Vol. 14, No. 3, pp. 499~505.

(16) Bessert, N. and Fredrich, O., 2005, “Nonlinear Airship Aeroelasticity,” *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 21, No. 8, pp. 731~742.

(17) Reifsnider, K. L., Henneke, E.G., Stinchcomb, W. W. and Duke, J. C., 1983, “Damage Mechanics and NDE

of Composite Laminates," *Mechanics of Composite Materials: Recent advances*, pp. 399~420.

(18) Kim, J. K., Park, Y. C., Kim, Y. J. and Lee, K. H., 2009, "Structural Optimization of a Control Arm with Consideration of Durability Criteria," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, No. 11, pp. 1225~1232.

(19) Park, H. S., Kim, J. K., Seo, . M. K., Lee, H. and Park, Y. C., 2009, "Structural Design of a Front Lower Control Arm considering Durability," *Journal of The Korean society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 8, No. 4, pp. 69~75.

(20) Jen, M. and Lee, C., 1998, "Strength and Life in Thermoplastic Composite Laminates under Static and Fatigue Loads. Part I : Experimental," *Int. J. Fatigue*, Vol. 20, No. 9, pp. 605~615.