

구조 및 NVH 성능을 고려한 복합재료 서브프레임 개발

한두헌* · 하성규*†

Development of Lightweight Composite Sub-frame in Automotive Chassis Parts Considering Structure & NVH Performance

Doo-Heun Han*, Sung Ha*†

ABSTRACT: Recently, according to environmental regulations, the automobile industry has been conducting various research on the use of composite materials to increase fuel efficiency. However, there has not been much research on lightweight chassis components. Therefore, in this research, the purpose of this study is to apply composite materials to the sub-frame of chassis components to achieve equivalent levels of stiffness, strength, NVH performance and 50% lightweight compared to the steel sub-frame. First, the Natural frequency of steel and composite specimens was compared to the damping characteristics of composite materials. Then, in this study, the Lay-up Sequence was derived to maximize the stiffness and strength of the sub-frame by applying composite materials. And this lay-up Sequence is proposed to avoid heat shrinkage due to curing during manufacturing. This process was designed based on a FEM structural analysis, and a Natural frequency and frequency response function graph was confirmed based on a modal analysis. The prototype type composite sub-frame was manufactured based on the design and the FEM analysis was verified through a modal experiment. Furthermore, it was fitted to the actual vehicle to verify the natural frequency and the indoor noise vibration response, including idling and road noise. This result was confirmed to be equivalent to the steel sub-frame. Finally, the composite sub-frame weight was confirmed to be about 50% of the steel sub-frame.

초 록: 최근 환경 규제에 의하여 자동차 업계는 차량의 연비를 높이기 위해서 복합소재를 활용한 경량화 연구가 다양하게 진행되고 있다. 하지만 샤시계 부품들은 복합소재를 활용한 경량화 연구가 미진하다. 따라서 본 연구에서는 샤시계 부품 중 서브프레임에 복합재료를 활용하여 스틸 동등 수준의 강성, 강도 그리고 NVH 성능과, 50%의 경량화를 이끌어 내는 것이 목표다. 우선, 복합재료의 Damping 특성을 확인하기 위하여, 스틸과 복합재료 시편을 활용하여 고유 진동수를 1차 비교하였다. 본격적으로 서브프레임 개발에 들어가 강성, 강도를 극대화 할 수 있는 Lay-up Sequence를 제시하였고, 제작과정 중 경화에 의한 열 수축을 피할 수 있는 Lay-up Sequence를 제시하였다. 이 과정은 구조해석을 바탕으로 설계를 하였고, Modal 해석을 바탕으로 고유 진동수와 주파수 응답 그래프를 확인하였다. 설계 안을 바탕으로 프로토타입 서브프레임을 제작하였고 단품 모달 실험을 통하여 구조해석 설계 안을 검증하였다. 나아가서 실차에 장착하여 공진점 확인 및 아이들링, 로드 노이즈 포함하여 실내 소음 진동 응답 비교를 하였고, 기존 스틸 서브프레임과 동등한 수준의 성능임을 확인하였다. 최종적으로 경량화는 기존 부품 대비 약 50% 무게 경량화 효과를 확인하였다.

Key Words: 복합재료(Composite materials), 샤시부품(Chassis Part), 서브프레임(Sub-frame), NVH(Noise Vibration Harshness)

Received 14 December 2018, received in revised form 16 February 2019, accepted 20 February 2019

*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

*†Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Corresponding author (E-mail: sungha@hanyang.ac.kr)

1. 서 론

세계적으로 지구 온난화와 대기 오염에 인하여 특히 자동차에 대한 연비 및 환경 규정을 강화시키고 있다. 자동차의 배기가스 배출 감소와 연비 향상을 하기 위해서 자동차 회사들은 친환경 차에 대한 연구와 동시에 기존 자동차 소재보다 가벼운 경량 소재를 사용하여, 자동차 차체를 경량화 시켜 배기가스 배출을 감소하며, 연비를 향상 시키려 노력하고있다[1].

그 결과 복합재료를 사용한 자동차 부품들은 경량화를 이루는 동시에 기계적 성능을 보전할 수 있었다. 자동차 분야에 탄소섬유 강화 플라스틱에 대한 여러 연구들이 진행되고 있다. 백미러, 스포일러, 범퍼와 같은 외장부품뿐만 아니라 강성 부품인 Roof, A-pillar, B-pillar, Bumper Beam 등 형상이 간단한 부품에만 적용되고 있으며, 친환경 자동차의 수소 연료탱크, 전기자동차의 배터리 팩에도 적용되고 있다[2,3].

하지만 자동차의 샤시 부품의 경우 형상이 복잡하여서, 복합재료를 적용하는 것은 미진한 수준이다. 따라서 본 연구에서는 샤시 부품 중 서브프레임에 대해서 연구를 진행했다. 서브프레임은 엔진·변속기, 메인 프레임, 로어암과 연결된다. 따라서, 충돌 테스트에서 차량의 엔진룸과 메인 프레임을 1차적으로 보호하는 중요한 역할을 하며, 노면으로부터 그리고 엔진 마운트, 차량 프레임으로 각종 하중, 진동, 소음을 받는다. 따라서 구조적으로 튼튼해야 하며 그리고 소음에 민감한 부품이다[4].

Fig. 1는 스틸 서브프레임의 형상과 부품리스트를 보여준다 스틸 서브프레임의 무게는 총 15.6 kg이며, 본 연구에서는 CFRP(복합재료)를 활용하여 40% 이상의 경량화 스틸 동등 수준의 강성 확보, NVH 특성 파악하는 것이 주목적이다.

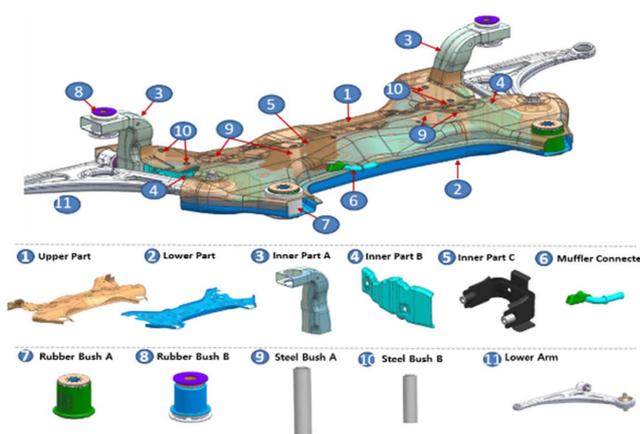


Fig. 1. Sub-frame Parts List

2. 이 론

2.1 Tsai-Wu 파손 이론

복합재료의 파손을 예측하기 위한 이론은 최대응력 이론, Hashin, Tasi-Wu 이론 등 다양한 이론들이 연구되고 있다. 이 중에서 Tsai-Wu 이론은 가장 범용적으로 사용되는 이론이다.

플라이의 섬유방향 응력과 횡 방향 응력, 전단 응력의 상호 간섭에 의한 영향을 동시에 고려할 수 있는 파손 기준이다. Tsai와 Wu는 응력장 내에서 파손면이 식 (1)와 같은 형태로 가정하였고, 이를 평면응력과 직교 이방성 재료로 가정하면서 식 (2)의 형태로 Tsai-Wu 파손식을 나타낼 수 있다.

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1 \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 \geq 1 \quad (2)$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_t X_c}, \quad F_{22} = \frac{1}{Y_t Y_c}, \quad F_{66} = \frac{1}{S_{st}^2} \quad (3)$$

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}, \quad F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \quad (4)$$

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} \left[1 - \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) \sigma + \left(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} \right) \sigma^2 \right] \quad (5)$$

이때, F_{12} 는 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 의 응력 상태를 받는 biaxial test에 의해 다음 식을 통하여 구할 수 있다. 그리고 응력 값을 대입하여 계산하면 식 (1)에서 좌변의 값이 1보다 커질 때 파손이 발생한다고 판단한다[5].

2.2 Natural Frequency

고유진동수란 어떤 물체가 가지고 있는 특유의 진동수이다. 외부에서 가해진 진동이 물체의 고유 진동수와 일치할 때 공진이 발생한다. 공진이 발생하게 되면, 진동과 소음이 급격하게 증가하고 궁극적으로 구조물이 파괴될 수 있다.

고유진동수는 주파수 응답 함수에서부터 도출할 수 있다. 주파수 응답 함수는 구조물 가진 시, 이에 상응하는 응답의 전달함수로서 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\{X(w)\} = [H(w)]\{F(w)\} \quad (6)$$

여기서 $[H(w)]$ 는 주파수응답함수, $\{X(w)\}$ 는 구조물의 응답, $\{F(w)\}$ 는 가진 함수를 나타낸다. 주파수 응답 함수의 행렬 $[H(w)]$ 는 식 (7)와 같이 나타낸다.

$$[H(w)] = ([K] - w^2[M])^{-1} = \frac{adj([k] - w^2[M])}{det([k] - w^2[M])} \quad (7)$$

여기서 $[K]$ 는 강성 행렬, $[M]$ 은 질량 행렬을 나타낸다. 주파수 응답 함수의 i, j 요소는 식 (8)와 같이 나타낼 수 있다.

여기서 w_r^2 는 r 번째 고유치(eigenvalue)이며 Φ_{ir}, Φ_{jr} 는 각각 r 번째 모드형상 벡터의 i, j 번째 요소이다. 고유진동수는 식 (8)의 분모항이 0에 가까워질 때 주파수 w_r 이 된다.

$$H(w)_{ij} = \sum_{r=1}^n \frac{\Phi_{ir}\Phi_{jr}}{(w_r^2 - w^2)} \quad (8)$$

이런 고유진동수를 측정하는 방법은 일반적으로 모달 실험을 통하여 측정한다. 모달 실험은 진동 실험의 입력 및 출력 데이터로서 구조물에 내포하고 있는 질량(Mass), 강성(Stiffness), 감쇠(Damping) 등과 같은 모달 매개 변수를 수학적으로 추정 할 수 있다[6].

2.3 Frequency Responsible Function (FRF)

FRF는 가진과 응답 비의 관계로 생성되며, 시간에 대한 응답과 자유진동 응답 또는 충격 응답함수데이터가 필요하다. 이론적 해석에서 FRF는 주파수 영역을 넘어 응답 정보를 제공하고 유한요소해석에서 주파수 범위 안에 시뮬레이션 응답으로 계산할 수 있다. 모달 실험은 입력과 응답 관계로 생성된 FRF를 이용하여 구조물의 특성을 예측할 수 있다.

FRF는 주파수 영역 안에 각각의 모드를 위한 고유진동수, 감쇠비, 모드 형상을 내포하고 있다. 고유진동수는 FRF Graph 안에서 Peak 하는 지점이고, 감쇠비는 이 Peak 점 주변에서 Q-Factor라는 이론을 통하여 계산할 수 있다[7].

3. Sub-frame Material Development

본 연구 대상인 서브프레임은 Damping 특성이 중요한 부품이다. 또한 원가를 낮추기 위하여 다양한 소재를 시편에 제작하여 적용을 시도했다. 이 시편을 이용하여 스틸 대비 Damping 특성이 어떻게 달라지는지 확인하였다.

3.1 Composite material design for sub-frame

복합재료는 섬유(Glade, 섬유 패턴, GSM(Gram per Square Meter)를 사용하는지에 따라서, 그리고 어떤 종류의 레진을 사용하는지에 따라서 소재의 강도, 강성이 달라지게 된다. 일반적으로 Toray T700, T300, Zoltek의 카본 섬유와 에폭시 레진을 사용한다. 하지만 이러한 섬유의 가격은 스틸 소재 대비 매우 높기 때문에 자동차 부품에 적용하기 부적합하다고 판단되었다. 따라서, 본 연구에서는 Zhongfu-shenyang(중국)의 SYT45s-12k 카본 섬유와, Cray valley 사의 Epopia LSP-8020B 폴리에스터 레진을 사용하였다. SYT45s-12k는 T700 섬유 90% 수준의 물성을 구현하며, Epopia LSP-8020B 레진은 에폭시 80% 수준의 물성을 구현하며, 반면 두 제품의 재료의 가격은 50% 반면에 수준으로 저렴하다. 또한 폴리에스터 레진은 제작 공정 중 기공이 적게 발생하며 크랙 발생 확률이 적기 때문에 이와 같이 선정하였다. 또

Table 1. Material Property

	T700/Ep [7]	SYT45s/PE [8]	ELG/Ep [9]
E1(MPa)	139,300	130,000	23,000
E2(MPa)	9,900	9,000	23,000
Nu12	0.28	0.299	0.28
G12(MPa)	7,100	7,100	-
G13(MPa)	7,100	7,100	-
G23(MPa)	2,960	4,000	-
X(MPa)	1,600	1,400	344
X'(MPa)	1,600	1,400	361
Y(MPa)	40	49	344
Y'(MPa)	246	199	361

한, 앞으로 복합재료의 재활용 연구도 활발하게 진행중이며, 따라서 본 연구에서 Core의 역할로 적합하지 판단을 위해 ELG 사의 Recycled Fabric도 같이 검증하였다. 각 물성은 Table 1에서 확인 가능하다.

3.2 Specimen Modal Test

앞서 언급한 물성을 검증하기 위하여, 그리고 스틸 대비 앞서 언급한 복합재료들이 고유진동수가 어떻게 달라지는지 확인하기 위해서 시편 모달테스트를 진행하였다.

Fig. 2은 시편의 Geometry와 Boundary Condition을 나타낸다. Table 2는 시편의 Case를 나타낸다. 본 모달 실험에서는 1차 고유진동수와 벤딩 모드 형상만을 다루었다.

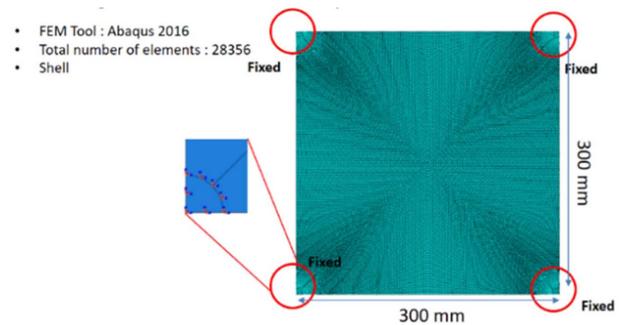


Fig. 2. FEM Modeling & Boundary Condition

Table 2. Case Information for Specimen

Case	Thickness [mm]	Material	Lay-up
Steel	2	Steel	-
NCF/Ep	2	T700/Ep	[0/90/45/-45]s
Recycled/Ep	2	Recycled/EP	-
NCF+Recycled/EP	4	T700+Recycle/Ep	[0/90/45/-45]s
NCF/PE	2	CF-SYT/PE	[0/90/45/-45]s

Table 3. Natural Frequency of Specimen

Case	1 st Natural Frequency (Hz)
Steel	72
NCF/Ep	87
Recycled/Ep	77
NCF+Recycled/EP	114
NCF/PE	81

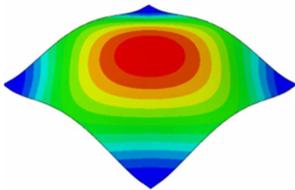


Fig. 3. Mode Shape at 1st Natural Frequency

Table 3에서는 1차 고유진동수를 비교하였고 St 대비 고 유진동수가 약 1~40% 높게 측정되었다. 특히 CF-SYTs/PE 를 사용한 NCF_2t 시편은 T700/EP 사용한 시편보다 고유 진동수가 약 5% 낮은 것을 확인할 수 있었다.

이는 NCT_2t_PE 소재는 T700/EP 강성이 약 5% 낮다는 의미이며, Composite Sub-frame을 개발 시 가격, 물성 모든 것을 고려 시 적합한 소재라는 것을 의미한다. Mode Shape 는 Fig. 3과 같은 벤딩 모드 형상만을 고려하였다.

4. Sub-frame FEM Analysis

4.1 FEM Modeling & Boundary Condition

구조해석을 진행하기 전에 CAD형상을 해석할수 있게 전 처리 과정을 진행해야 한다. Cad형상에 Element를 생성하 였고, CAD를 단순화하기 위해서, 실제 서브프레임의 6개 의 파트 용접을 CAE 환경 에서 구현해주었다.

Fig. 4는 유한 요소 모델과 실제 서브프레임을 나타낸다. Mesh 는 Shell Type Mesh로, Elements는 총 444,429개로 S4R elements를 적용하여 유한요소 모델로 구성하였다. 그리고 서브프레임의 고무 부쉬와 스틸 부쉬는 각 부품의 상 하단 중심 부분에 Reference point를 생성하고 Abaqus의 Coupling 기능을 이용하여 Reference point와 고무 부쉬와 스틸 부쉬 의 상 단면 사이에 Kinematic constraint를 각각 부여하여 구

- FEM Tool : Abaqus 2016
- Total number of elements : 44429
- Shell



Fig. 4. Sub-frame FEM Modeling

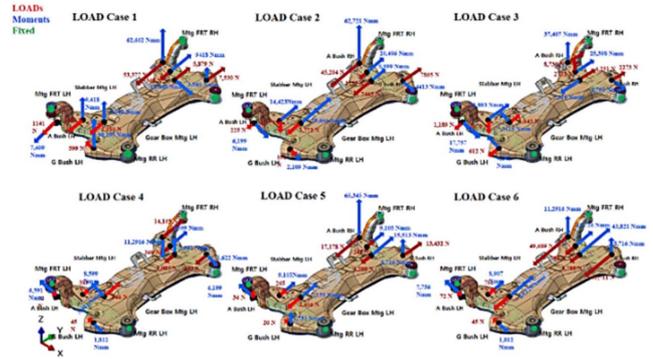


Fig. 5. Sub-frame Load & Boundary Condition

현하였다.

하중 및 경계 조건은 Fig. 5을 보면 확인할 수 있다. 4곳의 고무 부쉬의 위치에 x, y, z축 변위, 회전을 구속하였고, 8점 에서 Force x, y, z방향, Moment x, y, z 방향으로 6가지의 서 로 다른 Multi Direction Load을 가하였다.

4.2 Steel Sub-frame static analysis

본 연구에서 복합 재료로 스틸을 대체하기 전에, Steel Sub-Frame에 대해서 Static Analysis Simulation을 진행하였다. 총 6가지의 하중에 대해서 구조해석을 진행하였다. Fig. 6은 Steel Sub-Frame의 해석결과를 Stress Contour로 나타낸 것이다. Contour를 통해서 주로 구조물의 오른쪽 보다는 왼쪽에 더 큰 하중이 작용한다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4는 6가지 하중에 대한 결과이다. Stress 값은 Von

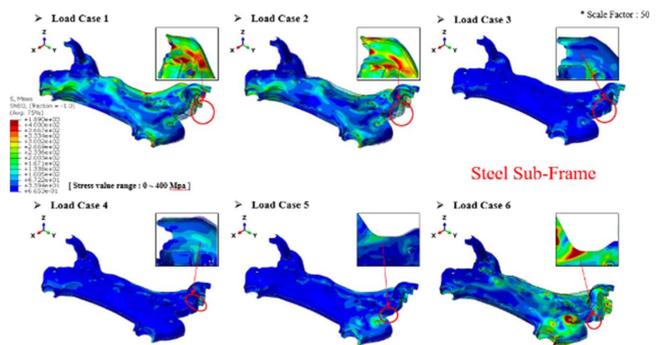


Fig. 6. Comparison of Stress Contour, Steel sub-frame

Table 4. Case result of sub-frame in 6 load

Case	Stress (MPa)	Failure Index	Disp (mm)
Load 1	669	0.838	1.916
Load 2	641	0.822	1.381
Load 3	120	0.154	0.286
Load 4	157	0.201	0.365
Load 5	247	0.317	0.496
Load 6	651	0.835	1.402

Mises Stress를 의미하고, Disp는 Displacement를 의미한다. 모두 FI 값은 1 이하로 안전하다는 경향을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 Load 1, Load 2, Load 6가 Sub-Frame에 구조적으로 큰 Damage를 가하는 대 하중 조건이라고 판단하였다. 복합재료 서브프레임의 구조적 설계 시 이 3가지 하중을 바탕으로 집중적으로 검토하고, 스틸 서브프레임의 해석 결과는 복합재료 서브프레임 설계 시 기준이 된다.

4.3 Composite sub-frame static analysis

Steel Sub-frame의 해석 결과를 바탕으로 3가지 Composite Sub-frame 설계 하중을 선정하였다. 이 설계 하중을 만족시킬 수 있도록 설계하였고 Table 5는 복합재료 4가지의 Lay-up sequence Case 설명을 나타낸다. 위의 Lay-up Sequence는 제작과정 중 경화에 의한 열 수축을 피할 수 있도록 대칭이 되도록 적층하였다.

Table 6를 보면 Steel Sub-frame의 FI 값 보다 Composite Sub-frame의 FI가 낮은 것을 확인하여, 강도적인 측면은 4케이스 모두 좋다고 확인할 수 있다. CF_0의 경우 Displacement의 결과를 바탕으로 평균적으로 다른 Composite Sub-frame 케이스와 비교하였을 때 20% 강성이 적게 확인되었다. 그 이유는 섬유류의 Ply angle이 사선으로 엮고, 모두 0(UD)로 적층한 케이스이기 때문이다. 이는 강도적인 측면에서는 CF_45가 더 튼튼하다고 확인할 수 있다. 하지만 Displacement 값은 CF_45 케이스 별로 8~25% 더 큰 것을 확인할 수 있기 때문에 강성적인 측면에서 좋지 않다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 결과를 통해서 CF_45가 가장 Steel Sub-frame과 성능이 유사한 것을 확인할 수 있었다.

추가적으로 강성을 높이기 위해서 제품의 두께를 두껍게 하는 방법이 있다. 하지만 그렇게 된다면 경량화 효과가

Table 5. Case information of composite sub-frame

Case	Thickness	Lay-up Sequence
Steel	2 mm	-
CF_0	4 mm	[0] ₉
CF_30	4 mm	[0/30/-30/90/0/90/-30/30/0]
CF_45	4 mm	[0/45/-45/90/0/90/-45/45/0]
CF_60	4 mm	[0/60/-60/90/0/90/-60/60/0]

Table 6. Result of sub-frame in load 3 cases

Case	Load 1		Load 2		Load 6	
	FI	Disp	FI	Disp	FI	Disp
Steel	1.20	1.91	0.82	1.38	0.83	1.40
CF_0	0.70	2.96	0.58	2.18	0.61	2.37
CF_30	0.72	2.41	0.54	1.68	0.59	2.04
CF_45	0.68	2.14	0.54	1.54	0.55	1.54
CF_60	0.69	2.35	0.52	1.78	0.54	2.06

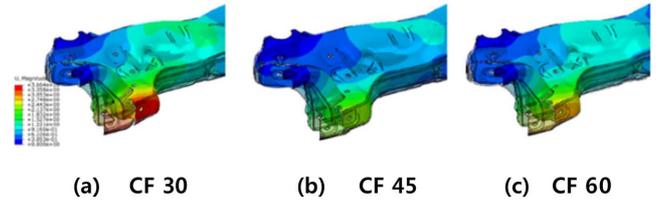


Fig. 7. Sub-frame displacement contour

없다. 또 다른 방법은 Core를 사용해서 두께를 증가시키는 방법이 있지만 본 연구에서 사용하는 제작 방식에는 적합하지 않다.

4.4 Composite sub-frame modal analysis

Steel 대비 Composite Sub-frame의 고유진동수가 어떻게 달라지는지 확인하기 위해서 앞서 Table 5의 케이스에 대한 모달 테스트를 진행하였다. 모달 테스트에서는 벤딩 모드 형상에 해당하는 고유진동수에 대해서 고려하였다. Table 7은 고유진동수를 정리한 표이다. Steel 대비 Composite Sub-frame은 1차 고유진동수는 약 20 Hz 정도 작지만, 2차 고유진동수부터는 Steel의 고유진동수 보다 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 해당 Mode에 변형되는 부분이 강성이 높기 때문이며, 즉 복합재료의 이방성 성질에 의한 것이다. Fig. 15은 Mode shape이며 모두 Bending 형상을 나고 있다. Steel

Table 7. Result of sub-frame Natural frequency

Case	1 st NF (Hz)	2 nd NF (Hz)	3 rd NF (Hz)	4 th NF (Hz)	5 th NF (Hz)
Steel	206	316	423	484	533
CF_0	167	329	424	500	538
CF_30	169	333	435	510	545
CF_45	173	339	448	523	566
CF_60	171	336	440	515	548

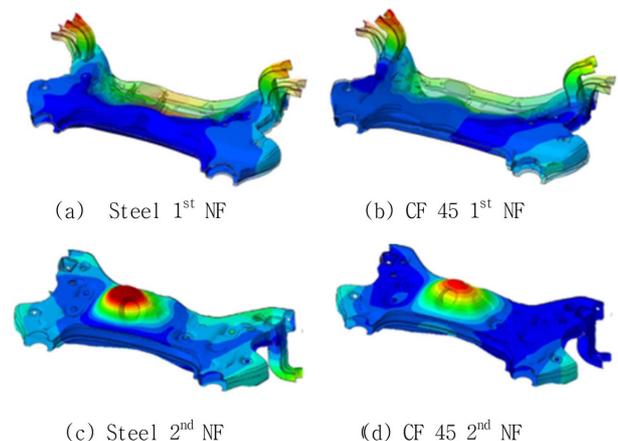


Fig. 8. Sub-frame mode shape

Sub-frame을 제외한 나머지 케이스 중에서 고유진동수가 가장 높은 것은 CF_45이다. 최종적으로 Case CF_45의 적층 순서와 두께로 Composite Sub-frame을 제작하였다.

5. Composite sub-frame manufacture

5.1 Sub-frame Redesign

복합재료를 적용해서 서브프레임을 제작하기 위해서는 Steel Sub-frame과 형상을 동일하게 제작할 수 없다. 이는 제작, 접합, 가공의 문제 때문이다. 또한 본 연구에서는 시스템 단위의 개발이 아닌, 단품의 구조물을 개발 후 기존 시스템계에 장착을 하여 상층 성능을 검토한다. 그렇기 때문에 최소한의 형상 변경을 해야 기존 타 부품과의 간섭을 피할 수 있다. 따라서 기존 스틸 서브프레임의 형상을 최소화 변경하였다. 본 연구에서는 접합 방식을 Bonding 체결 방식을 사용하였다. 모두 Bonding Area를 증가시키기 위해 변경하였다.

5.2 Sub-frame Manufacture

서브프레임을 제작하기 위해서는 몰드가 필요하고, 본 연구에서는 FRP 몰드를 제작하였다. FRP 몰드를 활용하여, Infusion 방식으로 Part 별 Sub-frame을 제작하였다. Fig. 10은 제작 순서를 나타낸다. Fig. 11은 완성된 Composite Sub-frame의 각 파트 나타낸다. 완성된 파트에 본딩을 하여 최종적으로 Composite Sub-frame을 완성하였다. Fig. 12는 완성된 Composite Sub-frame이다.

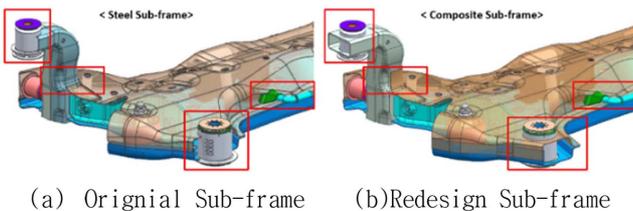


Fig. 9. Sub-frame redesign



Fig. 10. Manufacture Method

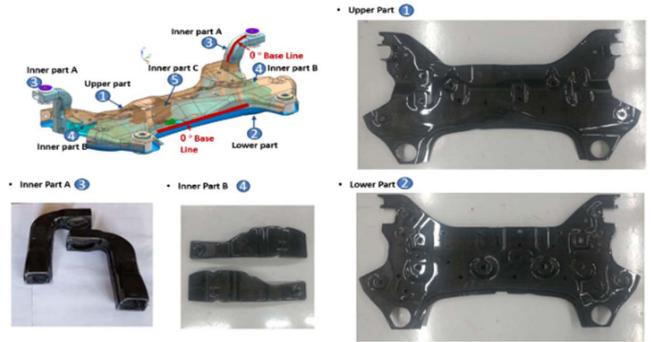


Fig. 11. Composite sub-frame parts



Fig. 12. Composite Sub-frame

6. Experiment

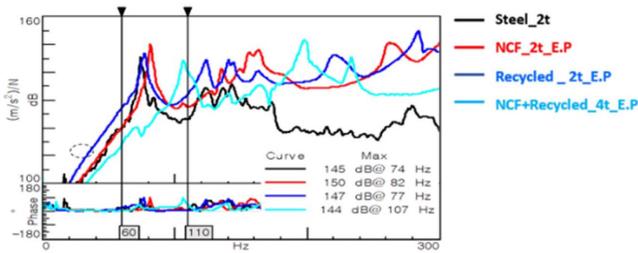
6.1 Specimen Modal Experiment

3.2 순서에서 시편 해석에 대한 시편 실험을 진행하였다. Table 2에서 1~4번까지 P.E를 사용한 Specimen 종류 중 Epoxy 계열의 시편에 대해서 실험을 진행하였다.

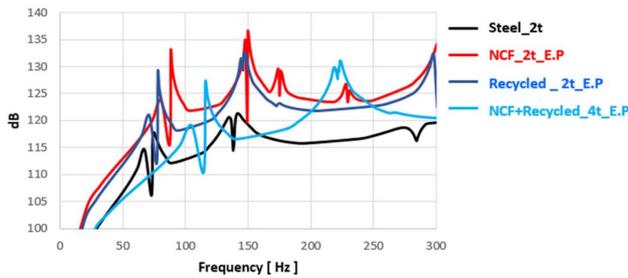
Fig. 13은 실험과 FEM 해석의 FRP 그래프이다. 고유진동수 일때, y축 소음 레벨이 피크되는 것을 확인할 수 있다. 또한 실험과 FEM 해석의 경향성이 동일한 것을 확인할 수 있다. FEM 해석과 실험의 고유진동수 비교시, 평균 1~3% 오차를 확인할 수 있었다. 그 원인은 복합재료 제작공정에서 발생할 수 있는 Void, Lay up angle 등 관련 인터페이스 물성 편차에 의한 오차로 예상된다.

6.2 sub-frame Modal Experiment

본 실험에서는 Modal 실험을 통해서 해석 결과를 검증하였다. 본 실험에서는 가속도 센서 타입을 18개 사용하였다. Fig. 14는 서브프레임의 센서 부착 위치를 보여준다. 실험은 Steel Sub-frame와 직접 Composite Sub-frame를 진행하였다. Table 7은 Steel & Composite Sub-frame의 실험과 해석의



(a) FRF graph through experiment



(b) FRF graph through FEM analysis

Fig. 13. Compare FRF graph between experiment & FEM

- Sensor Type : Acceleration Sensor
- Number of Sensors :18

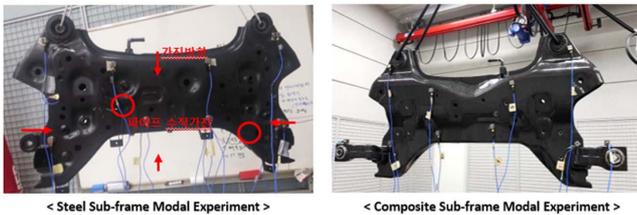
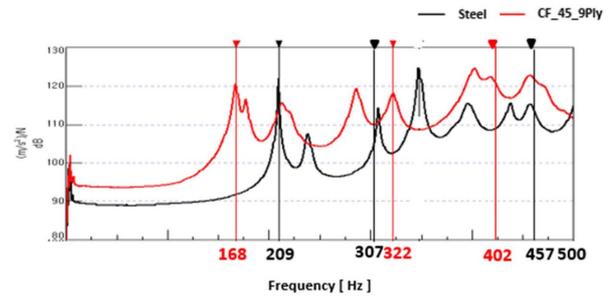


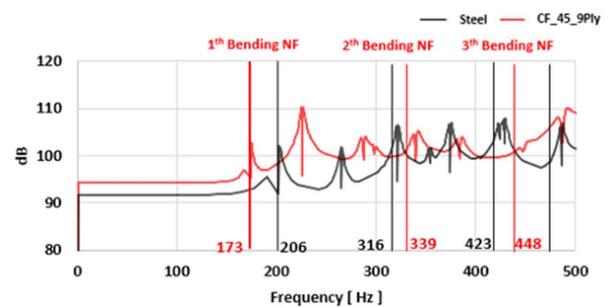
Fig. 14. Sub-frame Modal Experiment

고유 주파수를 비교한 표이다. Steel Sub-frame의 경우 1차, 2차 벤딩 고유 진동수는 평균 1~3% 오차 발생하였다. Composite Sub-frame의 경우 1차, 2차 벤딩 고유 진동수는 평균 2~5% 오차 발생하였다. 오차가 발생한 이유는 제작 시 Part 별 접합을 본딩 방식을 이용하여 체결하였다. FEM Modeling 시 Abaqus의 Tie 기능을 이용해서 Part 별 체결을 하였다. Tie는 Part 별 강제로 체결하는 방식으로 이 차이로 인하여서 오차가 발생하였다. 그리고 제작 공정 시 발생하는 Void, 작업자에 의한 미세한 Lay-up sequence 각도의 뒤 틀림에 의해서 오차가 발생한것으로 예상된다.

또한, 실험을 통하여 Damping Ratio를 추출하였다. 이를 통해서 Steady State Modal Analysis를 통해서 추가적으로 FRF Graph (Frequency Response Function)를 도출하였다. Fig. 15(a)는 실험을 통해서 도출한 FRF 그래프이며, y축 소음 레벨이 Steel 대비 10 정도 올라간 것을 확인할 수 있다. 고유 주파수 별 Peak가 발생하는 것을 확인할 수 있고, 그곳이 고유진동수를 뜻한다. Fig. 15(b)는 FEM 해석을 통해서 얻은 결과이며, Fig. 15(a)와 같이 고유진동수와, 그때 그래



(a) FRF graph through experiment



(b) FRF graph through FEM Modeling

Fig. 15. Compare FRF graph between experiment & FEM

프가 Peak 현상이 발생하는 것을 보아 경향성이 동일하게 나타났다고 판단되었다.

7. 결 론

본 연구에서는 Sub-frame의 소재를 강재에서 복합 재료로 대체할 수 있는 다양한 설계 변수들을 제시하였으며 실제 제작 및 실험을 통하여 이를 검증하였다. 요약하면 다음과 같다.

1. Sub-frame의 cost effective를 바탕으로 강성, 강도를 극대화할 수 있도록 다양한 재료를 이용하여 시편 Test를 진행하였고, 이를 바탕으로 소재를 선정하였다. 그리고 적정 설계를 통하여 Composite Sub-frame의 Thickness와 Lay-up Sequence를 결정하였다.
 2. FRP Mold & Composite Sub-frame을 직접 제작하여서, 모달 실험을 하였다. 해석 결과와 2~10%의 오차를 확인하였고, 해석의 정확성을 검증하였다.
 3. Sub-frame의 소재를 Steel에서 복합재로 대체한 결과, 약 50% 가량 무게 경량화 효과를 확인하였다.
- 이상으로, Sub-frame의 소재를 강재에서 복합재로 대체 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 현대자동차가 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

1. Palencia, J.C.G., Furubayashi, T., and Nakata, T., "Energy Use and CO₂ Emissions Reduction Potential in Passenger Car Fleet Using Zero Emission Vehicles and Lightweight Materials", *Energy*, Vol. 48, No. 1, 2012, pp. 548-565.
2. Cheon, S.S., Jeong, C.-H., Ham, S.-W., and Kim, G.-S., "Development of the Piecewisely-integrated Composite Bumper Beam Based on the IIHS Crash Analysis", *Composites Research*, Vol. 31, No. 1, 2018, pp. 37-41.
3. Kong, C., Park, H., and Park, K., "Paper : A Study on Structural Design of Natural Fiber Composites Automobile Body Panel Considering Impact Load", *Composites Research*, Vol. 28, No. 5, 2015, pp. 285-290.
4. Brown, J.C., Robertson, A.J., and Serpento, S.T., "Motor Vehicle Structures: Concepts and Fundamentals, 8, 2001.
5. Tsai, S.W., and Wu, E.M., "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, 1971, pp. 58-80.
6. Blevins, R.D., and Plunkett, R., "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape", 1980, pp. 461-462.
7. Tsai, S.W., and Melo, J.D.D., "A Unit Circle Failure Criterion for Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 123, 2016, pp. 71-78.
8. Zhongfu Shenying Carbon Fiber Co., Ltd., China, SYT45 CF Property, 2018.
9. ELG Carbon Fiber ; Recycled Carbon Fibre: A New Approach to Cost Effective Lightweighting, 2017.