

탄소섬유 복합재로 된 자동차 루프에 대한 동특성 해석 및 실험

Analysis and Experiment on dynamic characteristics of a Carbon Fiber Reinforced Composite Automotive Roof

제형호* • 진용선* • 김찬목** • 강영규** • 사종성***

Hyung-Ho Jea, Yong-Sun Jin, Chan-Mook Kim, Young-Kyu Kang and Jong-Sung Sa

Key Words : Automotive Roof(자동차루프), Lightweight Structure(경량구조물), Dynamic Characteristics(동특성), Carbon Fiber Composite(탄소섬유복합재), Stacking Sequence(적층순서), Natural Frequency(고유진동수), Optimization(최적화)

ABSTRACT

Analysis and experiment on dynamic characteristics of automotive roof have been carried out experimentally and numerically to design a lightweight roof. Finite element analysis of a conventional steel automotive roof was verified by experiments on vibration characteristics. The dynamic analysis of carbon fiber reinforced composite automotive roof shows that the roof stiffness changes as the fiber orientation of the laminated panel changes. Optimization results yielded a composite roof, which was 52% lighter, than the steel conventional steel automotive roof. This paper addresses a design strategy of composite roof for weight reduction.

1. 서 론

오늘날 급속한 산업의 발달과 인구증가로 인한 에너지 문제의 심각성이 대두되고 있다. 이 중 에너지 소비가 크고 우리생활에 가장 밀접한 관련이 있는 자동차의 연료절감은 화석연료의 한계성으로 인한 많은 연구가 진행되고 있다. 이와 관련하여 미국에서는 1993년에 연방정부와 미국 자동차 업계 사이에 저 연비, 고효율 자동차의 연구와 개발에 있어서 세계 기술의 선두주자로 발돋움하고자 협력관계를 맺었다. 연방정부와 자동차회사 사이에 설립된 PNGV(Partnership for a New Generation of Vehicles)는 2004년 까지 소형승용차의 연비 80mpg를 목표로 연구를 수행하고 있다⁽¹⁾. 이러한 연비를 충족시키는 대책으로 재료의 변경에 의한

경량화가 크게 대두되고 있다. 경량화 재료 중 복합재료는 중량에 비해 강도나 강성이 우수한 특성을 가지고 있어서 항공우주분야로부터 자동차산업에 이르기까지 소재의 응용성이 넓어지고 있다. 그러나 차체의 경량화는 차체의 동적 강성을 떨어뜨리고, 이는 차체 진동과 소음 성능을 떨어뜨린다. 따라서 경량화에 있어서 진동 특성을 필수적으로 고려하게 된다. 현재 자동차 차체의 복합재료화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국의 포드사에서는 이미 1977년 SAEC(The Annual Society of Automotive Engineers Convention)에서 100% 탄소섬유 강화 플라스틱제 시작차를 전시했다. 이 차는 기존 철재차량의 무게와 비교했을 때 약 51.5% 정도 경량화 되어 연비가 기존차량의 약 35%정도 개선되었다⁽²⁾. 또한 탄소섬유 복합재를 적용한 자동차 루프의 진동 및 충격성능을 해석한 사례⁽³⁾와 대쉬패널(Dash Panel)에 적용하여 엔진 방사소음을 평가한 연구가 있다⁽⁴⁾. 또한 차체 바디의 설계시 강도를 고려한 복합재의 적용사례⁽⁵⁾ 등 다양한 연구가 진행되고 있다.

* 국민대학교 자동차공학전문대학원
E-mail: rosmay75@lycos.co.kr
Tel: (02) 919-0514, Fax: (02) 910-4728

** 국민대학교 자동차공학전문대학원

*** 서일 대학 자동차과

(5) 등 다양한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 자동차 루프에 대해 복합재료의 대체가능성을 연구하고자 한다. 이를 위해 기존의 자동차 루프에 관한 진동특성을 실험하였고 유한요소 해석을 통해 동특성을 검증하였다. 이를 바탕으로 탄소섬유 복합재를 적용한 루프모델의 동특성 파악과 최적화 해석을 수행하여 루프의 구조적 경량화를 확인하였다. 또한 복합재료의 적층각을 변화시키면서 루프의 주파수 특성추이를 비교함으로써 경량화로 유발될 수 있는 진동 소음 문제의 해결방안을 제시하고자 한다.

2. Roof의 동특성 해석 및 실험

2.1 Steel Roof의 모델링

본 논문에 적용된 루프는 프런트 루프레일(Roof - Rail), 리어 루프레일과 4 개의 보우루프(Bow-Roof)로 구성된 루프 어셈블리(Roof Assembly) 모델로 총 8 개의 박판(Shell) 모델로 구성되었다. Fig.1 에 나타낸 것과 같이 박판은 CQUAD4(2694 개) 와 CTRIA3(198 개)의 판 요소를 사용하였고 점 용접 부위는 두 판의 용접점을 강체요소(RBE2)로 결합하는 일반적인 방법을 사용하였다. 그리고 보우루프의 본딩(Bonding) 부분은 접합부분의 면적을 고려하여 스프링요소(CELAS1)로 모델링 하였다. 유한요소 모델링과 해석은 상용소프트웨어인 ALTAIR/HYPER MESH, MSC/PATRAN 과 MSC/NASTRAN⁽⁶⁾을 사용하였다.

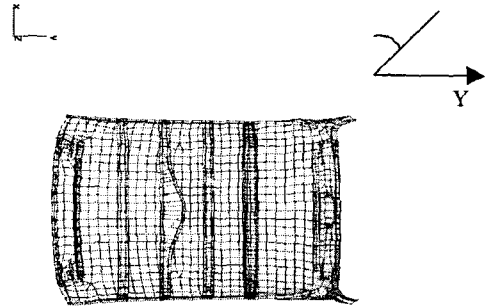


Fig.1 Roof FE-Model

2.2 Steel Roof의 동 특성 실험

루프의 유한요소 모델을 검증하기 위하여 실험을 병행하였다. Fig.2 에서 루프의 모드해석을 위한 응답 점의 수는 91 개이며 각각 3 축가속도계를 사용하였으므로 총 자유도는 273 DOF 가 된다. 경계 조건은 양단 자유상태로 실험 하였으며, 랜덤(Random) 가진에 의한 각 부위의 진동 신호를 측정하여 수집하였으며 실험에서는 다채널 신호분석기(LMS CADA-X)와 B&K 사의 가진기(B&K 4805)와 가속도계(B&K 4506)를 사용하였다.

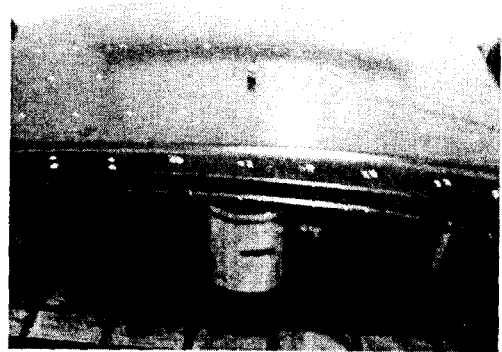


Fig.2 Measurement points of roof vibration

2.3 복합재 Roof의 동 특성 해석 및 최적화

본 연구에서 적용한 복합재료의 모델링은 루프패널의 상판에만 적용하였다. 복합재료의 적층순서

는 $[0_2 / 0^\circ / 90^\circ]$ 이며, 해석수행 과정에 있어서 적층판은 평면응력(Plane Stress) 상태하에 있고 완전하게 본딩되어 있다. 복합재의 적층은 중립면에 대하여 대칭인 대칭적층(Symmetric laminates)이며 복합재를 적용한 루프상판은 1mm의 두께를 가진다. 이는 플라이(Ply)당 0.125mm인 8장이 적층된 결과이며, 이는 기존의 Steel (0.8mm)에 비해 0.2mm의 두께가 증가되었다. Table 1에서는 복합재료의 물성치를 나타내었으며 물성치의 모델링은 MSC/NASTRAN의 직교이방성(Orthotropic) 물성을 정의한 MAT8과 단일방향성으로 된 플라이의 물성을 정의한 PCOMP의 코드를 이용해서 입력하였다. 또한 Steel 루프와 유사한 진동특성을 얻기 위하여 MSC/NASTRAN SOL 200 최적화 모듈을 이용하여 해석을 수행하였다. 최적화 수행에 있어서 초기 모델은 $[45^\circ / 0^\circ / 90^\circ]_s$ 의 적층각이 적용된 모델을 바탕으로 수행하였다. 설계에 있어서 목적함수는 루프 중량의 최소화이며 복합재 플라이(Ply)의 두께의 변화와 적층각을 설계변수로 선정하였다. 제한조건(Constraints)의 설정에 있어서는 기존의 Steel 루프와 비슷한 진동특성을 가져야 하므로 첫번째 모드의 공진주파수가 서로 같도록 공진주파수에 제한조건을 두었다.

Table 1 Material properties of laminated composite

Material	Carbon/Epoxy laminates
t (mm)	1
E_1 (Gpa)	114.7
E_2 (Gpa)	7.589
G_{12} (Gpa)	4.77
ρ (Kg/m ³)	1510
ν_{12}	0.28

3. 결과 및 고찰

3.1 Steel Roof의 동특성 결과 및 고찰

자동차 루프의 유한요소 해석의 검증을 위하여 1차적으로 고유치 해석을 수행하여 루프의 고유진동수와 모드 형상을 실험값과 비교하였으며 2차적으로 주파수 응답해석을 수행하여 FRF를 실험값과 비교함으로써 유한요소해석의 타당성을 검증하였다. 특히 보다 정확한 해석을 수행하기 위해서는 정확한 모델링이 필요한데 이를 위해서 실험해석결과는 유한요소모델과 비교하여 유한요소모델의 개선에 적용된다. 본 루프 패널의 경우 주파수 응답해석에 있어서 보다 정확한 해석을 위해서 감쇠비를 실험을 통하여 구한 값을 적용하여 모델의 개선이 있었다.

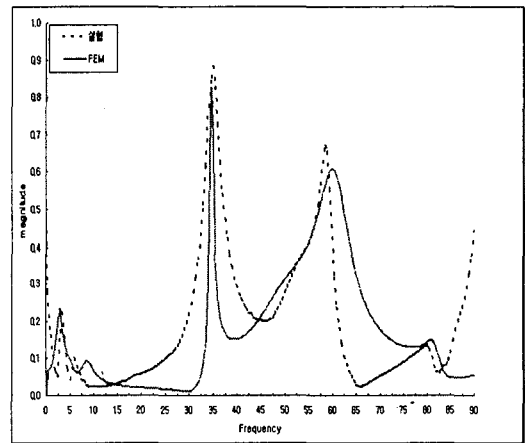
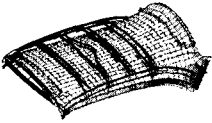

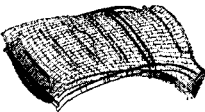
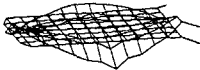




Fig.3 Comparison of FRFs of the roof between modal test and FE analysis

Fig.3과 Table 2은 실험과 유한요소 해석에서 구한 주파수 응답함수와 고유모드를 비교한 것으로 2번째 고유진동수가 6.3%의 오차를 보였는데 이는 루프의 특성상 많은 점 용접 부위와 보우루프의 본딩(Bonding) 부위의 구현조건 차이로 사료된다. 전체적인 주파수와 고유모드는 비교적 잘 일치하며 해석의 수행이 잘 이루어진 것으로 볼 수 있다.

Table 2 Comparison of the natural frequencies of conventional steel roof

Analysis	Test
	
1 st Bending: test (35.4)&FEM (34.7) / Error (2.2%)	
	
2 nd Bending: test (49.1)&FEM (52.4) / Error (6.3%)	
	
3 rd Bending: test (60.49)&FEM (60.54) / Error (0.08%)	

3.2 복합재 Roof의 결과 및 고찰

일반적으로 복합재료의 진동특성은 플라이의 적층 순서에 따라서 민감하게 바뀐다. 따라서 특정한 굽힘이나 비틀림 모드는 적층순서를 바꿈으로써 진동수 변화를 가져올 수 있다. 복합재 루프의 유한요소 해석 결과를 Table 3에 나타내었다. 유한요소 모델에서 루프의 좌우방향이 X축으로 전후방향이 Y축으로 설정되었다. 즉 루프의 좌우방향을 적층각 0°로 하였다. $[0^\circ / 90^\circ]_s$ 적층은 루프의 좌우방향을 굽힘 모드의 제어에 유리하고, $[90^\circ$

$/ 0^\circ]_s$ 의 적층은 전후방향 굽힘모드에 유리하며, $[45^\circ / 90^\circ]_s$ 적층은 비틀림 모드의 제어에 유용함을 확인했다. 본 연구의 루프모델은 어떠한 지지점의 구속이 없는 양단 자유상태이다. 또한 루프패널 곡률과 보강재의 강성에 의해 진동 모드 형상이 전체적으로 복잡한 형태를 보인다. Table 3에서 다양한 적층각도에 따른 고유진동수의 변화를 살펴보면 1, 2차의 주파수 변화가 거의 비슷한 경향을 보이는데 이는 모드의 형태를 살펴볼 때 루프의 전후 좌우방향으로 굽힘이 발생하고 중앙부분이 상하 진동하는 모드의 형태로 주파수의 변동이 미소한 것으로 추정할 수 있다. 또한 보우루프나 루프레이일의 강성에 비해 패널에 적용한 복합재의 강성의 차이도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 5, 6차의 비틀림 모드에서는 45° 적층이 0°, 90°의 적층각도에 비해 5-10Hz의 차이를 보이는데 이는 45°의 적층이 비틀림 모드에서는 진동수를 증가시키는 경향을 잘 보여주고 있다. 또한 경계조건을 달리 했을 경우 각 모드에서 크게 고유진동수를 증가시키는 결과를 볼 수 있었다. 전체적으로 플라이의 적층각은 저차에서 보다는 고차에서 진동수를 크게 증가시키는 경향을 보였다.

Fig.4와 Fig.5는 NASTRAN SOL 200을 이용한 최적화 수행 결과로 목적함수와 설계변수의 변화를 보여준다. 플라이의 두께와 적층각도가 목적함수에 수렴하여 변하는 것을 볼 수 있다. 플라이의 두께는 0.125(mm)에서 0.2(mm)로 더 두꺼워지는 결과를 보였고, 적층각은 45°에서 90°와 5.5°로 변화했다. 마찬가지로 루프의 전체 무게도 초기치에 비해 약간 증가하는 결과를 보였다. 이는 제한조건인 35Hz를 수렴하기 위해 두께가 약간 증가하는 결과로 보여진다. 이때의 공진주파수는 34.9Hz로 만족할 만한 결과를 얻어낼 수 있었다. Table 4는 최적화 해석결과를 바탕으로 기존의

Steel 루프와 복합재료 루프의 차이를 보여준다. 전체적으로 패널의 두께는 증가하였으나 무게는 52% 감소하였으며, 경량화달성 및 진동특성에서도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

Table 3 Natural frequencies of the carbon fiber reinforced roof for various stacking sequence

적층각	고유진동수 [Hz]					
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th
[0° / 0° / 90°] _s	30.1	48.4	52.1	74.1	77.2	81.9
[30° / 2/0° / 90°] _s	30.5	48.3	53.6	75.4	83.9	89.7
[45° / 2/0° / 90°] _s	31.1	49.0	54.8	77.1	85.7	92.4
[60° / 2/0° / 90°] _s	31.3	49.5	55.3	77.2	84.4	91.6
[90° / 2/0° / 90°] _s	31.3	49.6	55.9	77.8	78.4	85.5

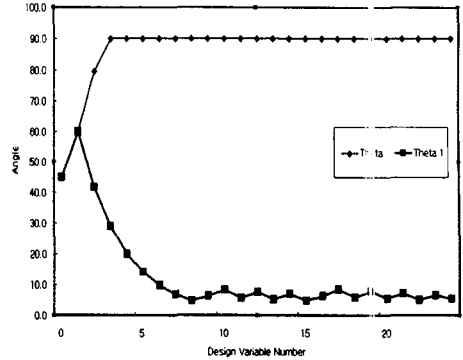


Fig.5 Design variables

Table 4 Weigh reduction of roof after optimization

	Steel	Composite	Remark
Thickness(mm)	0.8	1	0.2 (↑)
Frequency(Hz)	35.4	34.9	
Weight (Kg)	15	7.2	52% (↓)

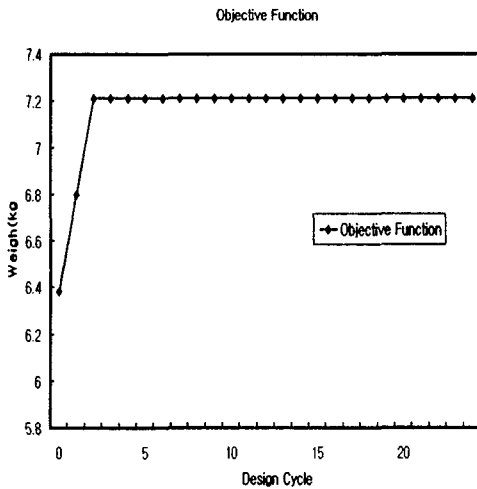


Fig.4 Objective function

4. 결론

본 연구에서는 자동차 루프의 실험 및 유한요소 해석을 통하여 동특성을 검증하고 탄소섬유가 적용된 루프의 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기존의 Steel 루프의 유한요소 해석의 동 특성과 실험에 의한 진동응답 특성이 적은 오차범위에서 잘 일치함을 알 수 있었다.
- (2) 복합재료를 자동차 루프에 적용한 결과 비슷한 동특성을 가지면서 무게는 52%의 감소효과를 얻어 경량화의 가능성을 제시하였다.
- (3) 복합재료의 적층각을 다양하게 변화시키면 해석한 결과, 진동모드에 따라 적층각의 변화로 루프의 강성이 증가함을 알 수 있었다.
- (6) 최적화 해석을 수행하여 복합재 루프의 두께와 적층각을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. PNGV Home Page. <http://www.ta.doc.gov/pngv>
2. 전의진, 조치룡, “ 복합재료와 자동차 “, 자동차공학회지, Vol, 13, No. 3, 1991.
3. Mark, E. Botkin, “ Modeling and Optimal Design of a Carbon Fiber Reinforced Composite Automotive Roof “, Engineering with Computers, 16, pp.16~23, 2000.
4. Barry, Yang, Steven.W. N., Thomas, E.W., James, R.S., “Laminate Dash Ford Taurus Noise and Vibration Performance”, SAE Paper, No.2001-01-1535.
5. Paolo, Feraboli, Attilio, Masini, Keith, Friedman, “Considerations on 6 Fiber Architectures of a Carbon/Epoxy Composite in the Design of a Vehicle Body”, SAE Paper, No.2002-01-2037.
6. MSC/NASTRAN Quick Reference Guide, V70
7. 이영신, 류충현, 김현수, “ 개구부가 있는 점 지지 된 복합재료 사각 판의 자유진동 해석”, 한국소음진동공학회추계학술논문집, PP.759~764, 1998.