

설계 민감도를 이용한 부분 구조물의 기여도 분석

이선병*·임홍재**·김효식***

Effects of the Component Structures on the Vibration of the Total system Using Design Sensitivity Analysis

Sun Byung Lee, Hong Jae Yim, Hyo Sik Kim

Key Words : Design Sensitivity(설계 민감도)

Abstract

In this research, design Sensitivity Analysis is presented for commercial vehicle such as large scale structural system. The proposed method is based on vibration analysis of the total structure and design sensitivity to identify the contribution factor of the component structure to the total system structure. In addition, approximated equations derived from response surface method are used for representative section properties of the thin walled beams.

1. 서론

버스와 같은 대형 구조물의 효율적인 설계 민감도 해석 및 최적 설계를 위해서는 각 부분 구조물이 전체 구조물에 어떻게 기여하는지를 먼저 알아야 한다. 최적 설계 시에 목적 함수나 구속 조건에 대하여 설계변수의 민감도 값이 크게 나타나는 부분은 성능함수에 중요한 영향을 미치게 되므로 최적 설계를 수행하기 전에 사용자가 미리 알아두어야 할 필요가 있다.

버스 차체와 같은 대형 구조물들은 각 부분 구조물로 나누어 생산하여 이를 다시 결합하는 방식을 택하고 있으므로 각 부분 구조물이 전체 구조물에 어떻게 영향을 주는지 알아낸다면 전체

구조물 주요 모드(1차 굽힘 진동 모드, 1차 비틀림 진동 모드)에 대한 예측이 가능하며 각 부분 구조물을 설계할 때 전체 구조물의 주요 모드와 같은 차체의 중요한 모드를 고려한 설계를 할 수 있다는 것이다. 루프 구조물 및 프레임 구조물, 사이드 판넬 구조물과 같은 부분 구조물들이 전체 구조물의 주요 모드에 얼마만큼 기여하는지를 알아낼 수 있다면 전체 구조물에 대한 부분 구조물의 효과적인 설계가 가능하다.

본 연구에서는 이러한 설계 방식을 바탕으로 설계 초기 단계에서 적용할 수 있는 차체의 박판보(thin walled beam) 구조물의 설계 민감도 해석에 대해 연구하였다.

2장에서는 버스 구조물과 같은 대형 구조물의 진동 해석을 통해 주요 모드(major mode)의 진동 특성에 대해 연구하고 프레임 구조물(frame structure)이나 루프 구조물(roof structure), 사이드 판넬 구조물(side panel structure)과 같은 부분 구조물(sub structure)을 이용하여 전체 구조물의 주요 모드에 대한 부분 구조물 모드의 설계 민감도

* 국민대학교 자동차공학전문대학원

** 국민대학교 기계·자동차공학부 부교수

*** 현대자동차 남양연구소

해석에 대해 연구하였다. 이를 통해서 부분 구조물이 전체 구조물의 주요 모드에 어떻게 기여하는지를 알 수 있게된다.

B.I.W.(Body In White) 모델의 부분 전체 구조물의 설계 민감도 해석 및 설계를 위해서, 해석 프로그램으로는 MSC/NASTRAN을 사용하였으며 버스 차체의 최적 설계를 위한 최적화 프로그램은 DOT^[1]를 사용하였다. 박판보 구조물의 단면 해석을 위해서는 SECOPT (SECTION OPTimizer)^[2]을 사용하여 단면적 및 관성 모멘트, 비틀림상수와 같은 단면 계수들(section properties)에 대한 해석을 수행하였다.

2. 차체 구조 해석 및 설계 민감도 해석

2.1 버스 차체의 구조 해석

차체의 구조 설계 기준들 중에서 중요하게 언급되는 기준들은 차량이 주행하는 동안에 노면과 엔진으로부터 들어오는 가진으로 인하여 차체가 받게 되는 동하중 이력과 승객이 직접 느끼는 승차감, 그리고 안전을 고려한 설계라고 말할 수 있다.^[3] 이러한 설계 기준들 중 구조 동역학(structural dynamics)측면에서 진동과 관련된 중요한 설계 사항 부분은 전체 차체 시스템의 굽힘 모드(bending mode)와 비틀림 모드(torsional mode)의 동적 거동이라 할 수 있다.

차체 설계 시에 차체 시스템 모드들과 현가 장치의 스프링 질량(sprung mass)의 모드 및 아이들 셰이크(idle shake)와 같은 치명적 현상을 방지하기 위해서는 엔진으로부터 들어오는 가진력과 연성을 최소화하는 것이 차체 설계에 필수라고 할 수 있다. 초기 설계 단계에서 진동과 관련된 설계 기준을 단기간에 효율적으로 분석 및 설계를 하기 위해서는 자동차 구조물의 동특성 해석을 위한 유한 요소 모델을 만들어야 한다. 초기 설계 단계에서는 50Hz 이하의 진동 모드에 대한 정확한 예측으로도 충분하므로 상세한 셸(shell)만을 사용한 상세 유한 요소 모델보다는 빔-셸 (beam & shell) 모델을 사용하는 것이 초기 설계 단계에서 더 유리하다고 볼 수 있다.^[4] 빔-셸 모델을 사용하면 해석 시간과 비용을 단축시킬 수 있으며 더욱 중요한 요인은 설계 모델의 변경 시

에 상세 셸 모델에 비해 효율적으로 설계 모델을 변경하고 재해석 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Fig. 2.1 및 Fig. 2.2는 위에서 언급한 설계 초기 단계의 빔-셸 대형 버스 모델의 고유 진동 해석(eigenvalue analysis)으로 1차 비틀림, 1차 굽힘 진동 모드를 나타내고 있다.



Fig. 2.1 1st torsion mode of bus B.I.W. model (16.42Hz)

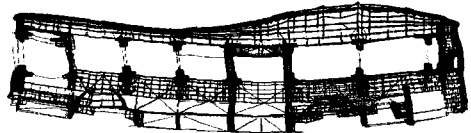


Fig. 2.2 1st bending mode of bus B.I.W. model (22.25Hz)

2.2 부분 구조물의 기여도 평가를 위한 설계 민감도 해석

설계 민감도 값을 구하기 위한 구속 조건의 도함수는 최적 설계 시 설계 문제를 근사화하는데 이용되는 수식으로 고유치 응답 민감도 해석(eigenvalue response sensitivity analysis)에 있어서 고유치에 대한 방정식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$([K] - \lambda_n [M]) (\phi_n) = 0 \quad (2.2.1)$$

여기에서 λ_n 은 n번째 고유치(eigenvalue), ϕ_n 은 n번째 고유 벡터(eigenvector), $[K]$ 는 구조 강성 행렬(structural stiffness matrix)이며 $[M]$ 은 구조 질량 행렬(structural mass matrix)이다.

위에서 표현된 고유치에 대한 지배 방정식은 정적 민감도 해석(static sensitivity analysis)의 경우와 마찬가지로 i 번째 설계 변수 x_i 로 미분될

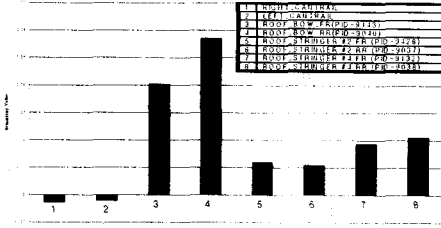


Fig. 2.6 Design sensitivity for the 1st torsion (Roof structure)

Fig. 2.6은 루프 구조물의 1차 비틀림 모드에 대한 설계 민감도 값이며 설계 변수 Roof Bow RR이 루프 구조물의 1차 비틀림 모드에서 설계 민감도 값이 크게 나타남을 알 수 있다.

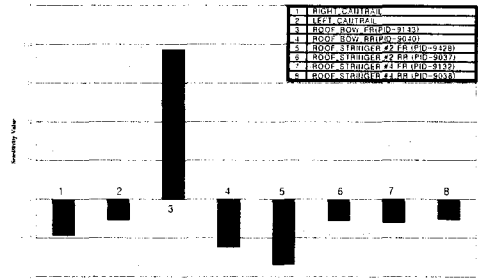


Fig. 2.9 Design sensitivity for the 1st torsion (Full structure)

전체 구조물의 1차 비틀림 진동 모드 및 1차 굽힘 진동 모드에 대한 설계 변수의 설계 민감도 값은 각각 Fig. 2.9, Fig. 2.10과 같이 나타난다.

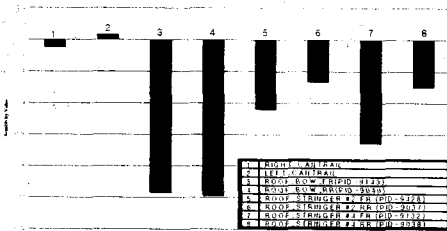


Fig. 2.7 Design Sensitivity for the 1st Bending (Roof structure)

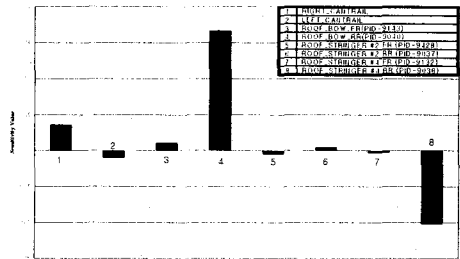


Fig. 2.10 Design sensitivity for the 1st bending (Full structure)

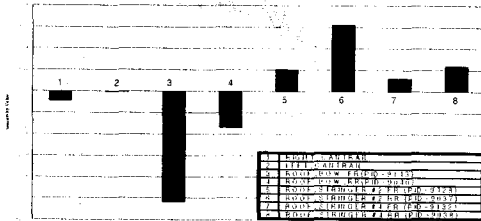


Fig. 2.8 Design sensitivity for the 2nd torsion (Roof structure)

Fig. 2.8에서는 루프 구조물의 2차 비틀림 모드에 대해 설계 변수 Roof Stringer #2 RR의 설계 민감도 값이 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

전체 구조물의 1차 비틀림 진동 모드에 대한 설계 민감도 해석에 대한 결과를 보면 설계 변수 Roof Bow FR의 단면 두께를 변경하면 다른 설계 변수에 비해 전체 구조물의 주요 모드에 가장 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있지만 전체 구조물의 조립 이전 단계에서 전체 구조물 모드에 대한 부분 구조물 모드의 민감도 값을 이용하여 전체 구조물을 예측하는 것이 필수적으로 고려되어야 하므로 전체 구조물과 부분 구조물에 대해서 해석한 설계 민감도 값을 이용하여 식 (2.2.5)에 적용하면 Fig. 2.11, Fig. 2.12와 같은 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 2.11은 전체 구조물에 대한 루프 구조물의 주요 모드(1st torsion, 1st bending, 2nd torsion)의 설계 민감도 값으로 1차 비틀림 모드에서는 루프 구조물의 1차 굽힘 모드에 대한 민감도 값이 크게 나타난 것을 알 수 있다.

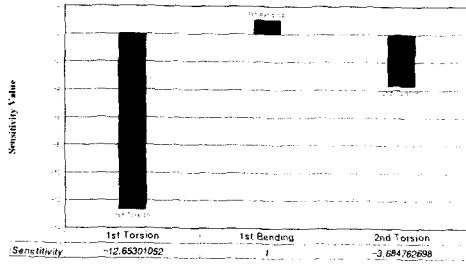


Fig. 2.11 Comparison of design sensitivity between Full and roof structure (1st torsion)

Fig. 2.12는 전체 구조물의 1차 굽힘 모드에 대하여 루프 구조물의 주요 모드에 대한 설계 민감도 해석으로 루프 구조물의 1차 비틀림 모드가 전체 구조물의 1차 굽힘 모드에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

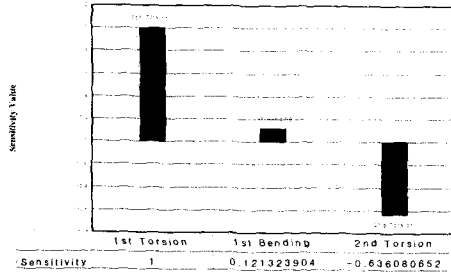


Fig. 2.12 Comparison of design sensitivity between Full and roof structure (1st bending)

위의 그림들을 통해 전체 구조물의 1차 비틀림 모드의 경우, 루프 구조물의 1차 굽힘 모드가 1차 비틀림 모드나 2차 비틀림 모드에 비해 더 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 전체 구조물의 1차 비틀림 모드에 대해 설계 변경을 할 경우에는 1차 비틀림 모드에 많은 영향을 주는 루프 구조물의 1차 굽힘 모드에서 설계 민감도 값이 가장 큰 설계 변수를 찾아 단면 두께나 형상을 변경하는 것이 전체 구조물의 1차 비틀림 모드의 고유 진동수를 효과적으로 올릴 수 있는 것이다.

Fig. 2.11과 Fig. 2.12를 통해서 루프 구조물이 전체 구조물에 어떻게 영향을 주는지를 알 수 있었다. 전체 구조물의 1차 굽힘 모드에 많은 영향을 주는 설계 변수는, 루프 구조물의 1차 비틀림 모드에 가장 많은 영향을 주는, Roof Bow RR 설계 변수로서 전체 구조물의 1차 굽힘 모드의 고유 진동수를 올리는 데 가장 큰 효과를 가져다

준다고 예측할 수 있다. 전체 구조물의 주요 모드에 대한 부분 구조물 모드의 설계 민감도 해석을 입증하기 위해서 전체 구조물에서 무게를 목적 함수로, 1차 굽힘 모드를 구속 조건으로 하여 루프 구조물의 설계 변수들에 대해서 확정론적 최적 설계를 수행 한 결과, Fig. 2.6에서 설계 민감도 값이 크게 나온 설계 변수인 Roof Bow RR 단면의 두께가 2.0에서 2.7837로 늘었으며 다른 설계 변수들의 두께는 주변 구속 조건의 최저값으로 수렴하였다.

최적 설계를 통해서 변경된 설계 변수(두께)를 전체 구조물과 루프 구조물에 적용하여 다시 고유 진동 해석을 하였다.

Table 2.1과 Table 2.2는 전체 구조물과 루프 구조물에 대해 최적 설계 수행 이전(원래 모델)의 고유 진동수 값과 최적 설계 후 변경된 단면에 대해 해석한 고유 진동수 값에 대해 나타내고 있다.

Table 2.1 Frequency of full structure after optimum design

	변경 前	변경 後	고유 진동수 변화량
1st Torsion	16.43 Hz	16.41 Hz	-0.02 Hz
1st Bending	22.27 Hz	22.46 Hz	+0.19 Hz

Table 2.2 Frequency of roof structure after optimum design

	변경 前	변경 後	고유 진동수 변화량
1st Torsion	3.28 Hz	3.34 Hz	+0.06 Hz

Table 2.1과 Table 2.2를 통해 부분 구조물의 1차 비틀림 모드의 고유 진동수 값이 증가함에 따라 전체 구조물의 1차 굽힘 모드의 고유 진동수 값이 증가함을 보여주고 있다.

Table 2.3과 Table 2.4에서는 루프 구조물의 2차 비틀림 모드에 가장 큰 영향을 주는 설계 변수인 Roof Stringer #2 RR의 두께를 2.0에서 3.0으로 변경한 단면에 대하여 전체 구조물의 1차 굽힘 모드의 고유 진동수 증가량과 비교하였다.

Table 2.3 Frequency of full structure (Roof stringer #2 RR)

	변경 前	변경 後	고유 진동수 변화량
1st Torsion	16.43 Hz	16.41 Hz	-0.02 Hz
1st Bending	22.27 Hz	22.27 Hz	+0.00 Hz

Table 2.4 Frequency of roof structure
(Roof stringer #2 RR)

	변경 前	변경 後	고유 진동수 변화량
2nd Torsion	16.11 Hz	16.20 Hz	+0.09 Hz

전체 구조물의 1차 굽힘 모드에 대해 가장 크게 영향을 주는 루프 구조물의 모드는 1차 비틀림, 1차 굽힘, 2차 비틀림 모드의 순이며 Table 2.1의 결과와 Table 2.3의 결과를 비교하면 설계 변수인 Roof stringer #2 RR을 변경했을 때보다 Roof bow RR을 변경하는 것이 전체 구조물의 1차 비틀림 고유 진동수 값을 더 크게 올릴 수 있었으며 이를 통해 루프 구조물의 주요 모드 중에서 1차 비틀림 모드가 전체 구조물의 1차 굽힘 모드에 가장 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

프레임 구조물 및 LH-Side 구조물에 대해서도 루프 구조물과 같은 방법을 적용하여 전체 구조물에 어떻게 영향을 주는지를 알아보도록 하자.

Fig. 2.13에서는 프레임 구조물의 설계 민감도 해석을 위한 설계 변수들을 정의하였다.

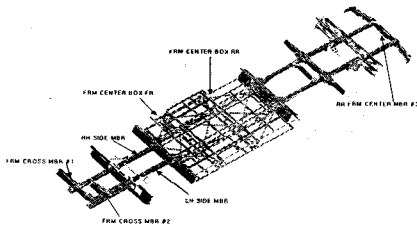


Fig. 2.13 Definition of design variables for frame structure

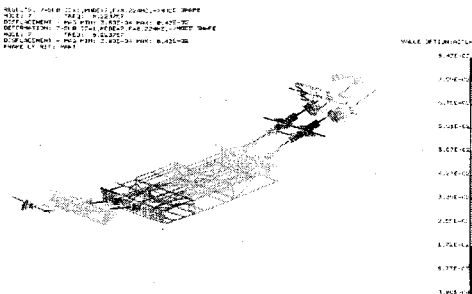


Fig. 2.14 1st bending mode of frame structure

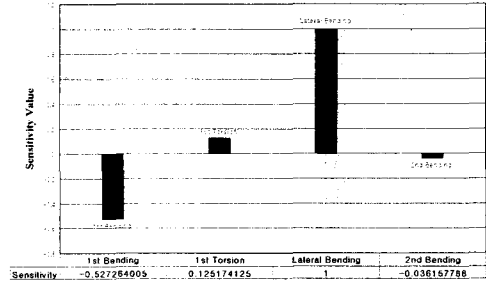


Fig. 2.15 Comparison of design sensitivity between Full and frame structure (1st torsion)

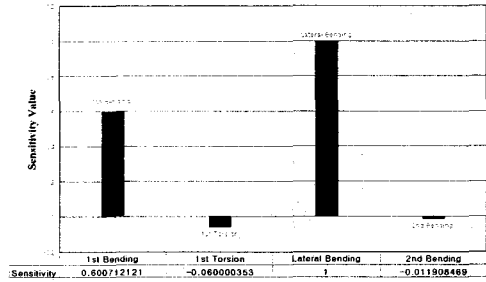


Fig. 2.16 Comparison of design sensitivity between Full and frame structure (1st bending)

Fig. 2.15를 통해서 는 전체 구조물의 1차 비틀림 모드에는 프레임 구조물의 1차 횡축 방향 굽힘 모드(1st lateral bending mode)가 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있으며 Fig. 2.16에서는 전체 구조물의 1차 굽힘 모드에 대한 프레임 구조물의 주요 모드의 설계 민감도 해석으로 전체 구조물의 1차 비틀림 모드에서와 마찬가지로 1차 횡축 방향 굽힘 모드가 가장 크게 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2.17은 LH-Side 구조물의 설계 변수들에 대해 보여주고 있다.

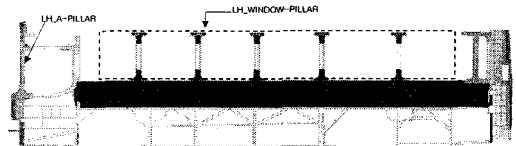


Fig. 2.17 Definition of design variables for LH side structure

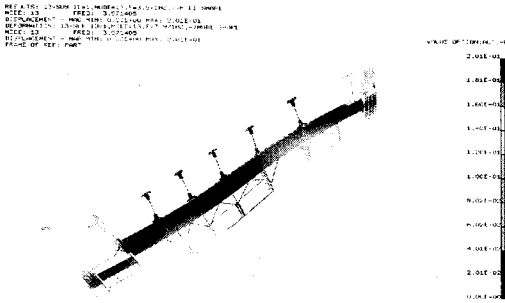


Fig. 2.18 1st torsion mode of LH side structure

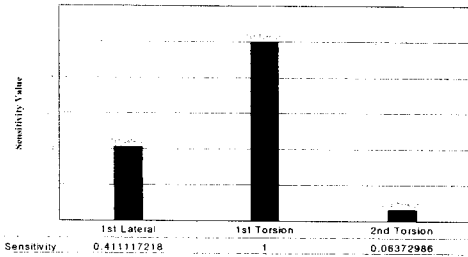


Fig. 2.19 Comparison of design sensitivity between Full and LH side structure (1st torsion)

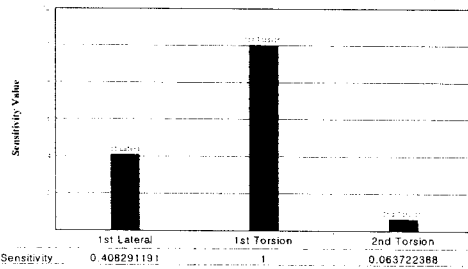


Fig. 2.20 Comparison of design sensitivity between Full and LH side structure (1st bending)

Fig. 2.19와 Fig. 2.20를 통해서서는 전체 구조물의 1차 비틀림 모드와 1차 굽힘 모드에 가장 큰 영향을 주는 LH-Side 구조물의 모드는 1차 비틀림 모드라는 것을 알 수 있다.

위에서 구한 부분 구조물 및 전체 구조물의 설계 민감도 해석을 통해서 각 부분 구조물의 주요 모드가 전체 구조물의 주요 모드에 어떻게 영향을 주는지 알았으며 부분 구조물 설계 시 이와 같은 결과들을 고려하여 설계해야 하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 박관보로 이루어진 B.I.W. 모델을 이용하여 전체 구조물 및 부분 구조물의 진동 해석을 바탕으로 부분 구조물을 이용한 설계 민감도 해석을 제시하였다.

설계 변수를 이용한 부분·전체 구조물의 설계 민감도 해석에서는 전체 구조물의 주요 모드(1차 비틀림 모드 및 1차 굽힘 모드)에 영향을 미치는 루프 구조물과 프레임 구조물, 그리고 LH-Side 구조물의 모드를 찾았으며 부분 구조물 주요 모드에 대한 전체 구조물의 주요 모드를 고려할 수 있는 설계 민감도 해석이 가능하게 되었다. 이를 통해 전체 구조물의 1차 비틀림 모드와 1차 굽힘 모드를 올리는 부분 구조물의 설계 변수를 찾아 전체 구조물 주요 모드의 고유 진동수를 올릴 수 있었다.

참고문헌

- (1) VanderPlaats, G. N., Hansen, S. R., DOT USERS MANUAL, Engineering Design Optimization, Inc. 1989.
- (2) 이호용, 박관보 구조의 강성도 해석 및 최적 설계, 석사학위 논문, 국민대학교 기계설계대학원, 1995.
- (3) Kamal, Mounir M. and Wolf, Joseph A., Modern Automotive Structural Analysis, Van Nostrand Reinhold Co. pp.35, 1987.
- (4) 임홍재, 이상범, "저진동 차체의 필라 설계 및 최적화 기법", 한국 소음 진동 공학회 춘계학술대회 논문집, pp.99-104, 1994.
- (5) Gregory, J. Moore, MSC/NASTRAN Design Sensitivity and Optimization User's Guide, Macneal-Schwendler Corporation, 1993.
- (6) 편성돈, 박관보 구조물의 최적 설계 시스템 개발에 관한 연구, 석사학위 논문, 국민대학교 자동차공학대학원, 1999.
- (7) Yim, H. J., "Technology for Initial Design & Analysis of Vehicle Pillar Structure for Vibration", G7 Workshop Proceeding, 1994.