

부분 구조물의 민감도 분석을 이용한 버스차체의 진동분석

이상범*

(논문접수일 2009. 2. 19, 심사완료일 2009. 7. 24)

Vibration Analysis of Bus Structure using Sensitivity Analysis of Bus Component Structures

Sang Beom Lee*

Abstract

In this paper, an analysis technique is presented for performing the effective design of bus structure. Sensitivity analysis is carried out for the natural frequency of component structures consisting of bus B.I.W. Local vibration modes of substructure, which large affect on the global vibration mode of the bus B.I.W., are obtained through the sensitivity analysis technique using the mathematical chain rule. And also the design variables, which are determined from the sensitivity analysis, are redesigned through optimum design process. The proposed analysis technique shows that the bus structure can be effectively designed considering the vibration characteristics.

Key Words : Bus Structure(버스차체), Design Sensitivity(설계민감도), Optimum Design(최적설계), Substructure(부분구조), Vibration Analysis(진동해석)

1. 서론

버스와 같은 대형 구조물은 여러 개의 부분 구조물(sub-structure)을 조합하여 만들기 때문에 각 부분 구조물의 동적 특성이 전체 구조물의 동적 특성에 미치는 영향을 예측할 수 있다면 매우 효율적으로 설계를 수행할 수 있다. 예컨대, 차체의 필러, 루프, 플로어 등 각 부분 구조물의 진동모드, 고유진동수 등이 전체 차체 구조물의 주요 진동모드나 고유진

동수에 미치는 영향을 예측할 수 있다면 각 부분 구조물을 설계할 때 전체 구조물의 주요 진동모드나 고유진동수를 고려한 설계가 가능하다. 부분 구조물의 모드 합성을 이용한 구조물의 민감도 해석이나 부분 구조 합성법을 이용하여 자동차, 선박, 공작기계 등 대형·복합 구조물의 설계에 많이 이용되고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

본 연구에서는 버스의 차체를 구성하는 루프, 프레임, 사이드 패널 등 각 부분 구조물의 낮은 진동수 진동(low

* 국민대학교 기계자동차공학부 (sblee@kookmin.ac.kr)
주소: 136-702 서울시 성북구 정릉동 861-1

frequency vibration)에 대한 민감도해석을 통하여 이들 부분 구조물이 전체 버스 구조물의 진동특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 각 부분구조의 진동모드가 전체 시스템의 진동특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 MSC/NASTRAN에서 제공하는 부분구조물 요소인 초요소(super-element)⁽⁵⁾를 이용하여 민감도해석을 수행하였으며, 최적설계는 DOT⁽⁶⁾를 사용하였다. 또한 보 구조물에 대한 단면적, 관성모멘트, 비틀림상수 등과 같은 단면계수 계산은 SECOPT⁽⁷⁾을 사용하였다.

2. 버스차체의 진동해석

본 연구에서는 50Hz 이하의 낮은 진동수 진동영역에서 발생하는 동적 특성을 분석하므로 버스 B.I.W. (body-in-white)를 모두 셸요소로 모델링하지 않고 빔요소와 셸요소를 조합한 모델을 이용하였다⁽⁸⁾. Fig. 1 및 Fig. 2는 B.I.W. 유한요소모델에 대한 진동해석 결과인 1차 비틀림 진동모드와 1차 굽힘 진동모드를 보여주고 있으며, 각각 16.4Hz와 22.3Hz의 고유진동수를 나타내고 있다.

3. 부분 구조물의 기여도 평가

3.1 부분 구조물 민감도 해석

설계민감도(design sensitivity)란 시스템을 구성하고 있는 어떤 설계변수의 변화에 따라 시스템의 응답특성이 어떻게

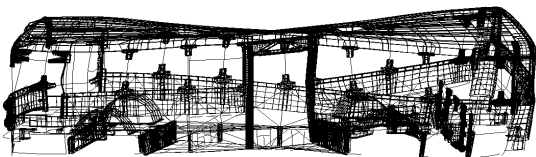


Fig. 1 First torsional vibration mode of bus B.I.W. (16.4Hz)

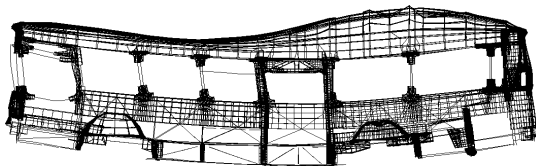


Fig. 2 First bending vibration mode of bus B.I.W. (22.3Hz)

변하는지를 표현하는 수학적 도함수 관계를 의미한다⁽⁹⁾. 따라서 이러한 관계를 활용하면 설계자가 요구하는 동적·정적 특성을 만족시키는 시스템을 효율적으로 설계할 수 있다.

진동하는 시스템에 대한 고유치 방정식은 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다^(10,11).

$$([K] - \lambda_n [M])\{\phi\}_n = \{0\} \quad (1)$$

여기에서 λ_n 은 전체 구조에 대한 n 번째 고유치, $\{\phi\}_n$ 은 전체 구조의 n 번째 고유벡터, $[K]$ 는 전체 구조의 강성행렬, 그리고 $[M]$ 은 전체 구조의 질량행렬이다.

진동 특성에 i 번째 설계변수가 미치는 영향은 식 (2)와 같이 고유치 방정식의 설계변수 x_i 에 대한 미분으로 나타낼 수 있다.

$$([K] - \lambda_n [M]) \frac{\partial \{\phi\}_n}{\partial x_i} + \left(\frac{\partial [K]}{\partial x_i} - \lambda_n \frac{\partial [M]}{\partial x_i} \right) \{\phi\}_n = \frac{\partial \lambda_n}{\partial x_i} [M] \{\phi\}_n \quad (2)$$

식 (2)의 양변을 $\{\phi\}_n^T$ 로 앞에 곱하면 좌변의 첫 번째 항은 $\{0\}$ 이 된다. 따라서 고유치에 대한 도함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \lambda_n}{\partial x_i} = \frac{\{\phi\}_n^T \left(\frac{\partial [K]}{\partial x_i} - \lambda_n \frac{\partial [M]}{\partial x_i} \right) \{\phi\}_n}{\{\phi\}_n^T [M] \{\phi\}_n} \quad (3)$$

식 (3)에서 정의한 설계 민감도 방법을 이용하면 설계 변수에 따른 전체 구조의 주요 모드에 대한 민감도 해석을 수행할 수 있다.

부분 구조의 설계 민감도 해석을 위해 식 (3)에서 나타난 고유치의 도함수를 부분 구조인 초요소에 대해서도 적용할 수 있으며 이를 식 (4)에 나타내었다.

$$\frac{\partial \tau_n}{\partial x_i} = \frac{\{\zeta\}_n^T \left(\frac{\partial [k]}{\partial x_i} - \tau_n \frac{\partial [m]}{\partial x_i} \right) \{\zeta\}_n}{\{\zeta\}_n^T [m] \{\zeta\}_n} \quad (4)$$

식 (4)에서 τ_n 은 부분 구조의 n 번째 고유치, $\{\zeta\}_n$ 은 부분 구조의 n 번째 고유벡터, $[k]$ 는 부분 구조의 강성행렬이며, $[m]$ 은 부분 구조의 질량행렬이다.

버스 전체 구조물의 특정 진동모드에 대한 부분구조의 진동모드 기여도를 나타내는 민감도는 다음 식 (5)에서 나타낸 바와 같이 수학적 연쇄법칙(chain rule)을 사용한 도함수 형

태로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \lambda_n}{\partial \tau_n} = \frac{\partial \lambda_n}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial x_1}{\partial \tau_n} + \frac{\partial \lambda_n}{\partial x_2} \cdot \frac{\partial x_2}{\partial \tau_n} + \dots + \frac{\partial \lambda_n}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial \tau_n} \quad (5)$$

식 (5)에서 λ_n 은 전체 구조의 n 번째 진동모드의 고유치, τ_n 은 부분 구조의 n 번째 진동모드의 고유치, x_i 는 i 번째 설계변수를 나타낸다. 이 식을 이용하여 각 부분 구조물의 주요 진동모드가 전체 구조물의 주요 진동모드에 미치는 영향을 파악할 수 있으며, 이러한 관계를 이용하여 최적설계를 수행할 경우 설계자가 요구하는 전체 구조물의 진동특성을 만족시키는 부분 구조물의 설계를 체계적으로 수행할 수 있다.

3.2 루프의 민감도 해석

버스의 루프는 전체적으로 평평한 모양을 하고 있기 때문에 굽힘과 비틀림에 대한 강성이 부족하므로 평판에 종방향과 횡방향으로 보강을 하여 강성을 증대시킨다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 버스의 루프에 부착되는 보강재의 위치를 나타내었으며 이들을 민감도해석을 수행하기 위한 설계변수로 설정하였다.

이 그림에서 RIGHT_CANTRAIL은 루프의 오른쪽에 있는 필러들과 연결되는 종방향 보강재이고, LEFT_CANTRAIL은 왼쪽 필러들과 연결되는 종방향 보강재이다. ROOF_BOW_FR은 루프의 전반부에 횡방향으로 부착되는 보강재이며, ROOF_BOW_RR은 루프의 후반부에 횡방향으로 부착되는 보강재이다. 그리고 ROOF_STRINGER #2 FR과 ROOF_STRINGER #4 FR은 루프 전반부에 종방향으로 설

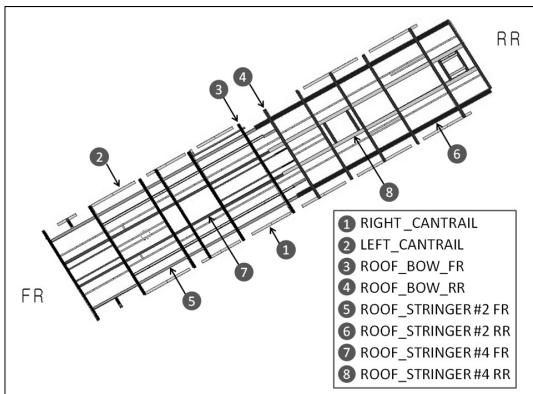


Fig. 3 Reinforcement structure of bus roof

치되는 보강재이고, ROOF_STRINGER #2 RR과 ROOF_STRINGER #4 RR은 루프 후반부에 종방향으로 설치되는 보강재이다.

루프에 대한 진동해석 수행 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 이들 그림에서 보는 바와 같이 1차 진동은 비틀림 모드로서 3.1Hz의 고유진동수를 나타내고, 2차 진동은 굽힘 모드로서 15.2Hz의 고유진동수를 나타내고 있다.

Fig. 6에 루프의 1차 비틀림, 1차 굽힘 및 2차 비틀림 진동 모드에 대한 민감도해석 결과를 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 1차 비틀림 모드에서는 ROOF_BOW_RR, 1차 굽힘 모드에서는 LEFT_CANTRAIL, 2차 비틀림 모드에서는 ROOF_STRINGER #4 RR에서 양의 민감도(positive

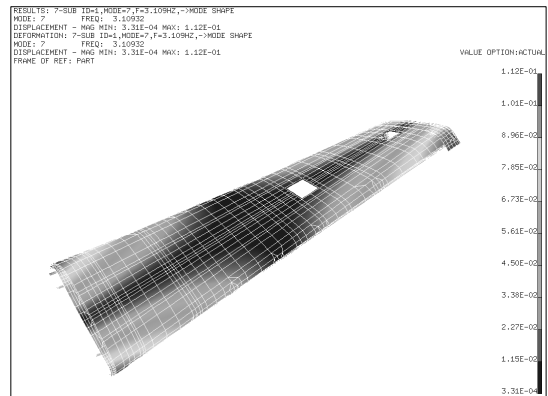


Fig. 4 First torsional vibration mode of roof structure (3.1Hz)

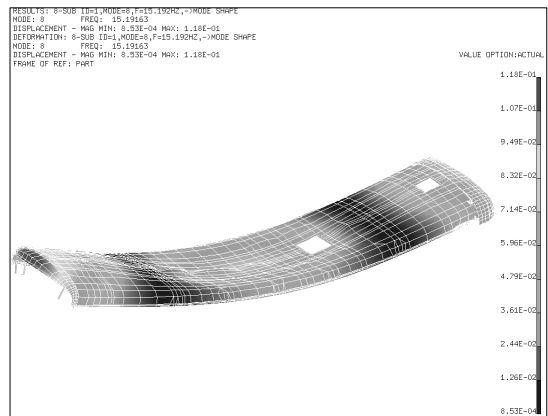


Fig. 5 First bending vibration mode of roof structure (15.2Hz)

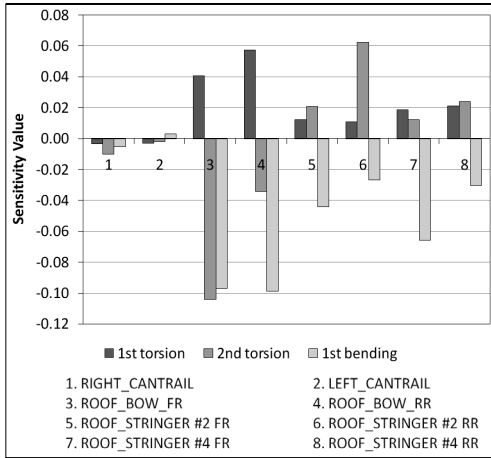


Fig. 6 Design sensitivities of roof reinforcement structure

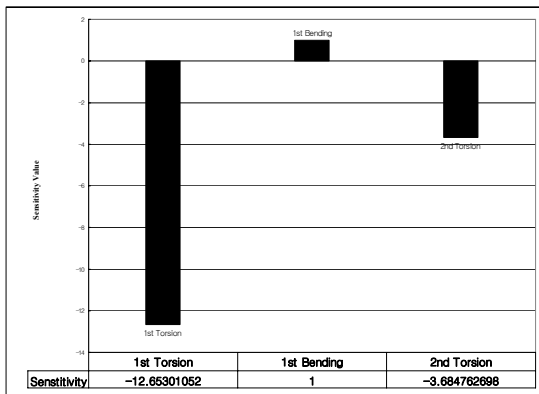


Fig. 7 Sensitivity analysis results for the first torsional vibration mode of B.I.W.

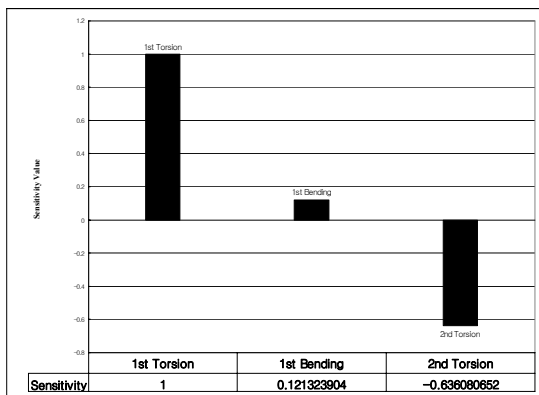


Fig. 8 Sensitivity analysis results for the first bending vibration mode of B.I.W.

sensitivity) 값이 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 ROOF_BOW_FR의 1차 굽힘 모드 및 2차 비틀림 모드 등은 음의 민감도(negative sensitivity)가 나타남을 볼 수 있는데, 이는 이들 설계변수의 상태값이 증가하면 질량 효과에 의해 오히려 고유진동수가 감소한다는 것을 나타낸다.

식 (5)를 이용하여 전체 구조물의 1차 비틀림 진동모드 및 1차 굽힘 진동모드에 대한 루프의 1차 비틀림, 1차 굽힘 및 2차 비틀림 진동모드의 기여도를 분석할 수 있으며, 민감도 해석 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 루프의 1차 굽힘 진동모드가 전체 구조물의 1차 비틀림 진동모드에 가장 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 따라서 전체 구조물의 1차 비틀림 진동모드의 고유진동수를 변경을 할 경우 Fig. 6에서 보는 바와 같이 루프의 설계변수인 LEFT_CANTRAIL의 단면 두께나 형상 등을 변경하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다. 또한 Fig. 8에서 보는 바와 같이 루프의 1차 비틀림 진동모드가 전체 구조물의 1차 굽힘 진동모드에 가장 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 따라서 전체 구조물의 1차 굽힘 진동모드의 고유진동수를 변경을 할 경우 루프 보강재 ROOF_BOW_RR의 단면 두께나 형상 등을 변경하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다.

3.3 프레임의 민감도해석

버스 프레임에 대해서도 루프 구조물과 같은 방법을 적용하였다. Fig. 9에 버스의 프레임을 나타내었으며, Fig. 10 및 Fig. 11에 고유진동해석 결과인 1차 굽힘 진동모드와 1차 비틀림 진동모드를 각각 나타내었다. Fig. 12와 Fig. 13에서 보는 바와 같이 전체 구조물의 1차 비틀림 진동모드 및 1차 굽힘 진동모드에는 프레임의 1차 횡방향 굽힘 모드가 가장

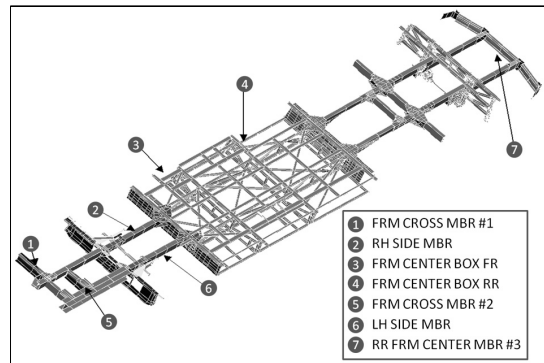


Fig. 9 Frame structure of bus

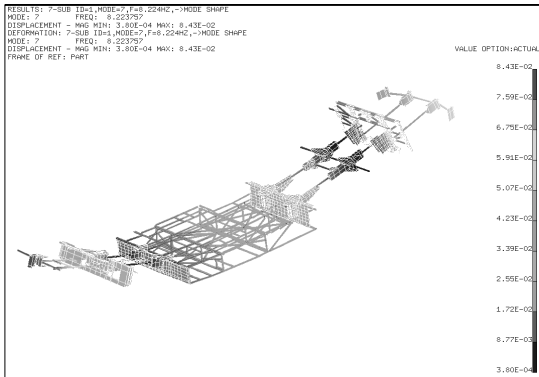


Fig. 10 First bending vibration mode of frame structure (8.2Hz)

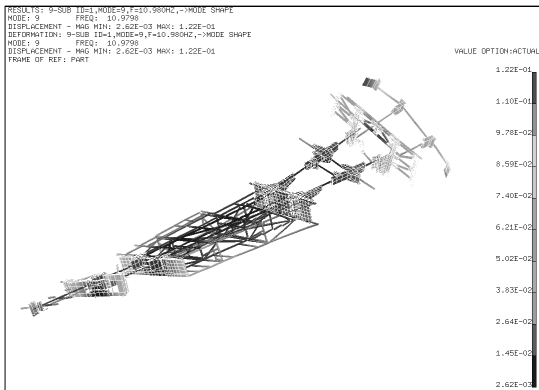


Fig. 11 First torsional vibration mode of frame structure (11.0Hz)

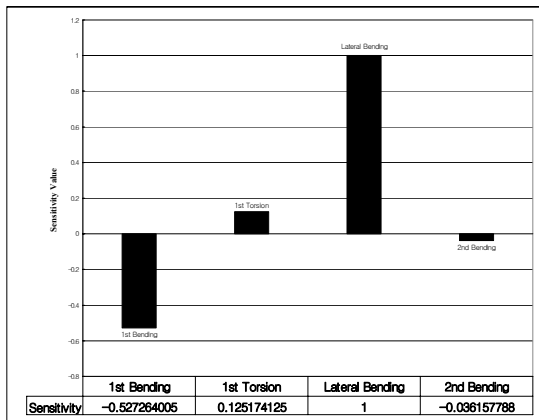


Fig. 12 Sensitivity analysis results for the first torsional vibration mode of B.I.W.

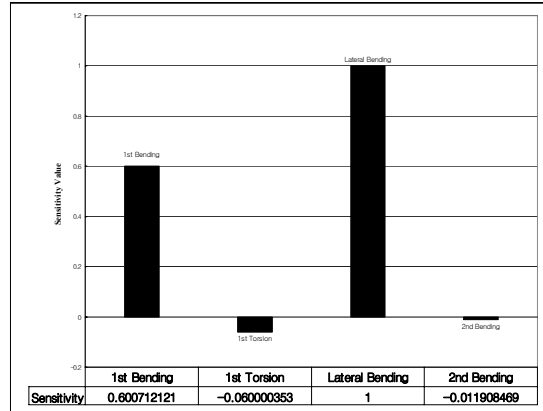


Fig. 13 Sensitivity analysis results for the first bending vibration mode of B.I.W.

큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

3.4 좌측 구조물의 민감도해석

Fig. 14는 좌측 구조물의 설계변수들을 보여주고 있으며, Fig. 15는 좌측 구조물의 1차 진동모드인 비틀림 모드를 보여

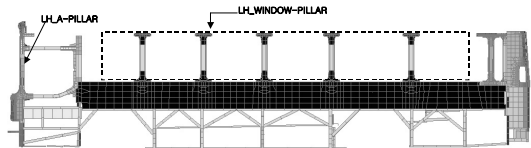


Fig. 14 Left side structure of bus

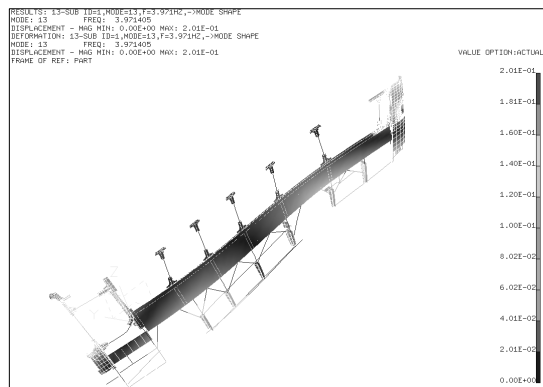


Fig. 15 First torsional vibration mode of left side structure (4.0Hz)

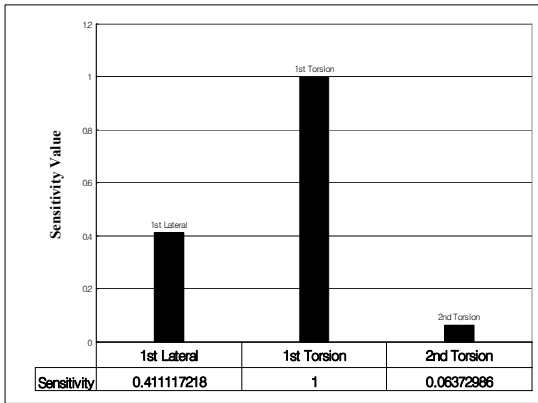


Fig. 16 Sensitivity analysis results for the first torsional vibration mode of B.I.W.

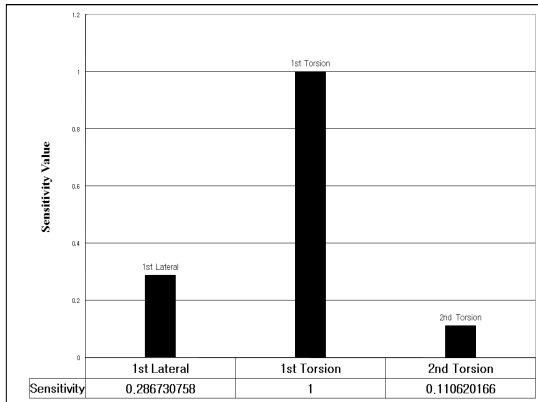


Fig. 17 Sensitivity analysis results for the first bending vibration mode of B.I.W.

주고 있다. 또한 Fig. 16과 Fig. 17을 통하여 전체 구조물의 1차 비틀림 모드와 1차 굽힘 모드에 가장 큰 영향을 주는 좌측 구조물의 진동모드는 1차 비틀림 모드라는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 부분 구조물 및 전체 구조물의 설계 민감도 해석을 통해서 각 부분 구조물의 주요 모드가 전체 구조물의 주요 모드에 어떤 영향을 주는지를 알아보았으며, 부분 구조물 설계 시 이와 같은 결과들을 고려하여 설계할 수 있음을 알 수 있다.

4. 최적설계

전체 구조물의 질량을 목적함수로, 전체 구조물의 1차 굽힘

Table 1 Optimization result for design variables of bus roof reinforcement structure

unit : mm

Design variable	Initial value	Optimized value	Change rate (%)
RIGHT_CANTRAIL	2.0	1.49	-25.5
LEFT_CANTRAIL	2.0	1.01	-49.5
ROOF_BOW_FR	2.0	2.22	+11.0
ROOF_BOW_RR	2.0	2.78	+39.0
ROOF_STRINGER #2 FR	2.0	2.10	+5.0
ROOF_STRINGER #2 RR	2.0	2.03	+1.5
ROOF_STRINGER #4 FR	1.5	1.51	+0.7
ROOF_STRINGER #4 RR	1.5	1.62	+8.0

Table 2 Change of natural frequencies of full body structure according to design change of roof reinforcement structure

		Before optimization	After optimization	Change of frequency
Full structure	1 st bending mode	22.3Hz	22.4Hz	+0.1Hz
Roof structure	1 st torsion mode	3.1Hz	3.3Hz	+0.2Hz

진동모드를 구속조건으로, 루프 구조물의 보강재 두께를 설계 변수로 설정한 후 상용 최적화 프로그램인 DOT⁽⁶⁾의 순차적 선형 프로그래밍(SLP: Sequential Linear Programming)법을 이용하여 최적설계를 수행하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 루프의 1차 비틀림 진동모드에 대하여 가장 큰 양의 민감도를 나타내었던 설계변수 ROOF_BOW_RR의 두께가 초기 두께인 2.0mm에서 2.78mm로 최적화됨으로서 가장 많이 증가한 것을 알 수 있다.

최적설계를 통해서 변경된 두께로 루프 구조물을 수정한 후 다시 고유진동해석을 하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 이 표에서 보는 바와 같이 부분 구조물의 1차 비틀림 진동모드의 고유진동수 값이 3.1Hz에서 3.3Hz로 0.2Hz가 증가함에 따라 전체 구조물의 1차 굽힘 진동모드의 고유진동수 값은 22.3Hz에서 22.4Hz로 0.1Hz 증가하였다.

5. 결론

본 연구에서는 전체 구조물의 특정 진동모드에 부분 구조

물의 설계 파라미터가 미치는 영향을 분석하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 버스 전체 구조물의 1차 비틀림 진동모드와 1차 굽힘 진동모드에 대한 루프 패널, 프레임 및 사이드 패널 등 부분 구조물의 특정 진동모드와의 관계를 표현하는 민감도를 수학적 연쇄법칙을 이용하여 만들었다.
- (2) 전체 구조물의 1차 비틀림 진동모드와 1차 굽힘 진동모드에 각 부분 구조물의 특정 진동모드의 기여도를 분석하였으며, 또한 각 부분 구조물의 특정 진동모드에 큰 영향을 미치는 설계변수를 찾았다. 이를 통해 전체 구조물의 특정 진동모드에 영향을 미치는 부분 구조물의 설계변수를 체계적으로 찾는 것이 가능하다.
- (3) 전체 구조물의 1차 굽힘 진동모드의 고유진동수를 구속 조건으로 설정하고 루프 구조물의 보강재 두께를 설계 변수로 선정한 후 최적설계를 수행하여 전체 구조물의 특성값을 만족시키는 부분 구조물의 설계 파라미터를 효율적으로 결정할 수 있었다.

향후, 본 연구 결과에 대한 유용성을 좀 더 면밀하게 검증하기 위해 본 연구결과를 토대로 전체 구조물에 모든 부분 구조물의 민감도해석 결과를 반영하는 최적설계를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, H. J. and Park, Y. S., 1997, "Modal Parameter Sensitivity Analysis Using Component Mode Synthesis Method," *1997 Spring Conference Proceedings of the KSNVE*, pp. 184~191.
- (2) Heo, J. H. and Ehmann, K. F., 1991, "A Method for Substructural Sensitivity Synthesis," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 113, pp. 201~208.
- (3) Lee, W. P., Kim, K. L., and Lee, D. M., 1996, "Dynamic Design of Machine Tool Structure by Substructure Synthesis Method," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 5, No. 4, pp. 82~89.
- (4) Huizinga, A. T. M. J. M., Campen, D. H., and Kraker, A., 1997, "Application of Hybrid Frequency Domain Substructuring for Modeling and Automotive Engine Suspension," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 119, pp. 304~310.
- (5) MSC/NASTRAN, 1997, *MSC/NASTRAN Superelement Analysis Seminar Notes*, MacNeal-Schwendler Corporation, Los Angeles, CA.
- (6) Vanderplaats, G. N. and Hansen, S. R., 1989, *DOT Users Manual*, Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, CA.
- (7) Lee, H. Y., 1995, *Stiffness Analysis and Optimal Design of Thin Walled Beam Structures*, Master Thesis, Kookmin University, Republic of Korea.
- (8) Lee, S. B. and Yim, H. J., 2004, "Analysis of Dynamic Characteristics Change of Middle-sized Bus by Attachment of Trim Components," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 13, No. 1, pp. 88~93.
- (9) Vanderplaats, G. N., 1984, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, McGraw-Hill Book Co., New York.
- (10) Gregory, J. M., 1993, *MSC/NASTRAN Design Sensitivity and Optimization User's Guide*, MacNeal-Schwendler Corporation, Los Angeles, CA.
- (11) Yim, H. J. and Lee, S. B., 1995, "Technology for Initial Design and Analysis of Vehicle Pillar Structures for Vibration," *Transactions of the KSNVE*, Vol. 5, No. 3, pp. 395~402.