

버스차체 동특성 파악을 위한 실험 모드해석 Experimental Modal Analysis for Understanding Dynamic Characteristics of BUS FULL BIW Assembly

이준호*·김경호**·박미유**·김경원**·송경호**·박윤식***

Joon-Ho Lee, Gyeong-Ho Kim, Mi-You Park, Kyoung-Won Kim, Kyoung-Ho Song and Youn-Sik Park

Key Words : Experimental modal analysis, Natural frequency, Mode shape, BUS BIW

ABSTRACT

It is necessary first to understand dynamic characteristics of bus full BIW assembly for fatigue endurance analysis. FE model has been used usually for analyzing the dynamic behavior of structures. A lot of experience and effort, however, is necessary to make the credible FE model. Experimental modal analysis of structures has been performed to verify the credibility of initial FE model and to update the model. In this work, experimental modal analysis was performed to understand dynamic characteristics of bus full BIW assembly in free-free boundary condition and the result was used to verify the initial FE model. In addition, some practical techniques, which were used in this experiment, were mentioned.

1. 서론

버스의 피로 내구 해석을 위해서는 먼저 버스 차체의 동특성을 정확하게 파악하여야 한다. 보통 차체의 동특성 해석을 위하여는 유한요소모델이 많이 사용되지만 신뢰성 높은 유한요소모델을 얻기 위해서는 많은 경험과 노력이 필요하다. 즉 차체 접합부의 강성을 유한요소모델에 적절하게 반영하는 것은 차체 동특성에 큰 영향을 미치므로 모드 실험을 통하여 유한요소모델을 검증하고 개선하는 절차가 꼭 필요하다. 본 연구의 목적은 피로 내구 해석을 위한 유한요소모델을 검증하기 위하여 차체의 실험 모드해석을 수행하는데 있다.

실험 대상은 다음과 같은 버스 차체와 버스차체 부분구조물이다.

- ① ROOF STRUCTURE (FRAME)
- ② ROOF STRUCTURE (FRAME+PANEL)
- ③ SIDE STRUCTURE (LI)
- ④ SIDE STRUCTURE (RH)
- ⑤ ENGINE COMPARTMENT
- ⑥ FLOOR STRUCTURE
- ⑦ FRONT BODY STRUCTURE
- ⑧ REAR BODY STRUCTURE

- ⑨ CENTER CHASSIS FRAME
- ⑩ FRONT CHASSIS FRAME
- ⑪ REAR CHASSIS FRAME
- ⑫ UPPER BODY BIW
- ⑬ CHASSIS FRAME ASSEMBLY
- ⑭ FULL BIW ASSEMBLY

실험적 모드 해석은 대상 구조물의 주파수 응답함수를 구하는 과정과 이로부터 모드 매개변수(고유진동수, 감쇠계수, 모드형상)를 구하는 과정으로 구성된다. 본 실험에서는 상용화된 신호 처리 및 모드해석 소프트웨어인 CADA-X 를 이용하였다.

2. 모드해석 개요

모드해석(modal analysis)은 구조물의 동특성을 파악하는 기술로서 이에 관한 내용은 매우 잘 정립되어 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 본 장에서는 대상 구조물(버스차체 및 이의 부분구조)에 적용된 실험 구성 및 방법 그리고 모드 매개변수 규명에 관해서 간략히 살펴본다.

2.1 실험장치 구성

버스 차체 및 이의 부분구조의 FRF(주파수 응답함수)를 측정하기 위한 실험장치 구성(test set-up)은 Fig. 1 과 같다. 그림에 나타난 대상 구조물은 버스 차체이지만, 다른 부분구조에 대해서도 동일한 실험 방법이 사용되었다. 구조물의 힘 입력(force input)을 위해서 가진기를 사용하였는데, 예를 들어서 ROOF 구조물의 경우, 한 방

* 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : glxtnw@hitel.net
Tel : (042) 869-3060, Fax : (042) 869-8220

** 한국과학기술원 기계공학과

*** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

향(plane normal)의 진동이 지배적이므로 하나의 가진기를 사용하였고(SIMO), 크기가 크고 3 차원 진동양상을 보이는 CHASSIS ASSEMBLY, UPPER BIW 와 같은 구조물은 2 개의 가진기를 동시에 사용하여 실험을 수행하였다(MIMO). 가진 신호로는 가장 많이 쓰이는 랜덤신호를 사용하였고, 입력되는 힘의 크기는 가진기와 구조물 사이에 부착된 힘 센서(force transducer)를 사용하여 측정하였다. 응답(response)은 가속도계를 사용하여 측정하였는데, 구조물의 진동특성에 따라 1 축 또는 3 축 가속도계를 사용하였다. 측정된 힘과 진동 신호는 미약하므로 증폭기(conditioning amplifier)를 통하여 증폭되고 데이터 수집기인 SCADAS II 를 통해 workstation 에 저장된다. 가진 신호의 출력, 데이터 수집 및 저장, 신호처리 그리고 모드해석을 위해서 상용 소프트웨어인 CADA-X 가 사용되었다. Table 1 은 모드 해석 실험에 사용된 장비의 spec.을 정리한 것이다.

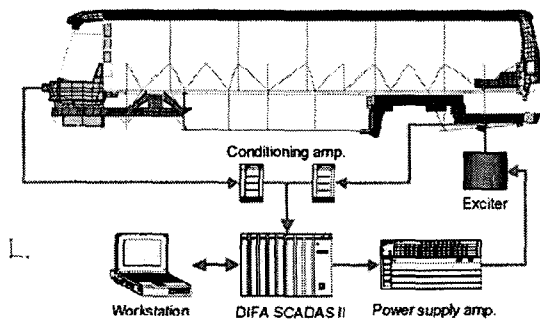


Figure 1 실험장치 구성도.

Table 1 실험장비의 목록 및 세부사항

실험 장비	제조사	장비명	비고
Exciter	MR Dynamics B & K	Model 50A Modal exciter type 4825	최대 가진력 : 500b 최대 가진력 : 2000N
Power supply amplifier	Techtron B & K	Model 7521 Model 2721	Model 50A Exciter type 4825
Force transducer	Rion	PF-31	
Accelerometer	Rion Rion ENDEVCO	PV-85 PV-08A Model 23	1-axis 3-axis 3-axis
Conditioning amplifier	B & K B & K B & K	Type 2526 Type 2635 Nexus	1-channel 1-channel 4-channel

2.2 구조물의 준비(preparation)

2.2.1 측정점 선정

측정 위치 및 개수는 대상 구조물의 관심 모드 형상에 따라 결정된다. 측정점의 개수가 작으면 모드 사이의 선형독립성(linear independency)이

낮고 따라서 모드 형상을 구분하기 힘들게 된다(spatial aliasing). 필요한 최소한의 측정 위치 및 개수를 파악하기 위해 Fig. 2 (a)의 자유경계단 조건의 평판을 고려하자. 평판의 첫번째 모드형상은 굽힘이며 두번째 모드형상은 비틀림이다. 이와 같은 두개의 모드를 관심모드라고 하면, 이를 규명하기 위해서는 Fig. 2 (b)와 (c)와 같이 최소한 6 개 지점에서 응답을 측정해야 한다는 것을 알 수 있다. 복잡한 형상을 가진 구조물의 경우에도 대상 구조물의 유한요소모델의 모드형상을 활용하면, 비교적 쉽게 측정점을 선정할 수 있다.

Fig. 3 은 유한요소모델로부터 구한 ROOF STRUCTURE 의 관심 모드 형상과 이로부터 선정된 측정점을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 선정된 측정점은 이러한 모드를 규명하기에 충분하다.

모드 형상을 올바르게 도시하기 위해서는 선정된 측정점의 좌표를 구하는 절차가 필요하다. 대상 구조물의 CAD 데이터가 있다면 이를 활용하여 병진좌표는 구할 수 있다. CAD 데이터가 없다고 해도 측정을 통하여 비교적 용이하게 구할 수 있다. 그러나 Fig. 4 (a)와 같이 선택된 측정점의 로컬 좌표계가 광역 또는 기준 좌표계에 대하여 기울어져 있다면, 이러한 3 차원 회전좌표를 측정하는 것은 매우 힘들다. 이러한 경우 Fig. 4 (b)와 같이 대상 구조물보다 매우 가벼운 fixture(mix & fix 로 제작)를 사용하여 로컬 좌표계를 광역 좌표계와 평행하게 만들면 된다. Fig. 4 (c)와 (d) 는 ROOF STRUCTURE 에 적용된 실례이다.

2.2.2 구조물의 지지(support)

모드해석 실험에서 가장 많이 사용되는 구조물 지지조건은 자유단과 고정단 경계조건이다. 고정단 경계조건은 비스차체와 같이 큰 구조물일 경우 실현하기는 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서 사용된 지지조건은 자유단 경계조건이다. 완벽한 자유단 경계조건은 구조물을 지지하지 않고 공중에 띄운 상태를 의미하지만, 유연한 스프링으로 구조물을 지지함으로써 이의 효과를 나타낼 수 있다. 이러한 지지로 인하여 구조물의 고유진동수에 미치는 영향을 검토하기 위해서, Fig. 5 (a)와 같은 자유단 경계조건의 2 자유도계 시스템을 고려하자. 이의 고유진동수는 다음과 같다.

$$\omega_1 = 0, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{2k}{m}}$$

Fig. 5 (b)는 유연한 스프링 k_0 로 지지한 경우이다. $k_0 \ll k$ 이면, 이 때의 고유진동수는 근사적

으로 다음과 같다.

$$\omega'_1 \equiv \sqrt{\frac{k_0}{2m}}, \quad \omega'_2 \equiv \sqrt{\frac{2k}{m} \left(1 + \frac{k_0}{8k}\right)}$$

즉, 유연한 스프링 k_0 에 의하여 ω_1, ω_2 가 각각 ω'_1, ω'_2 로 변경되었다. 여기서 ω'_1 은 시스템 전체 질량과 스프링 k_0 에 의한 강체 모드(rigid body)의 고유 진동수이다. 실험으로 측정하는 구조물의 첫번째 고유진동수는 ω'_2 이므로 참값 ω_2 와의 오차는 근사적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\omega'_2 - \omega_2}{\omega_2} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\omega'_1}{\omega'_2} \right)^2$$

ω'_1 과 ω'_2 의 비가 10이 되도록 k_0 를 설정하면, 측정된 고유진동수 ω'_2 는 참값과 0.5% 정도로 매우 작은 오차를 보이게 된다. 일반적인 시스템의 경우에도 강체 모드의 고유진동수를 관심 주파수 영역의 10%이하가 되도록 설정하면, 관심 주파수 영역내의 모드 매개변수의 변화량은 매우 작게 된다($O(10^{-3})$). 이를 검증하기 위해 Fig. 6과 같은 평판에 대해, 자유단 경계조건을 부가한 경우와 유연한 스프링으로 지지했을 경우의 고유진동수를 비교하여 보았다(Tab. 2). 여기서 자유단 경계조건 대신에 유연한 스프링으로 지지하더라도 고유진동수의 변화량이 매우 작은 것을 확인할 수 있다. 실례로서 Fig. 7 (a)는 자유단 경계조건을 만들기 위해서 FRONT CHASSIS를 스프링을 이용하여 지지한 상태를 나타내며, Fig. 7 (b)는 측정된 FRF를 나타낸다. Fig. 7 (b)에서 볼 수 있듯이 구조물의 첫번째 고유진동수는 강체 모드 고유진동수보다 10 배 이상 크므로 이렇게 구한 고유진동수는 참값과 오차가 매우 작다고 예측할 수 있다.

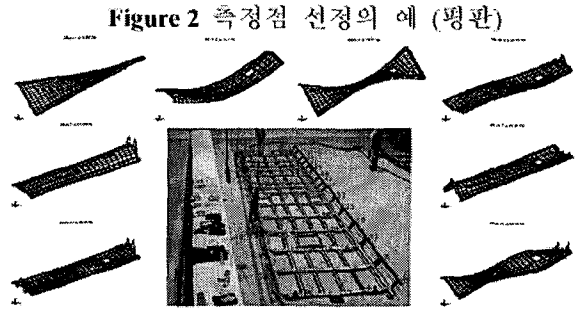
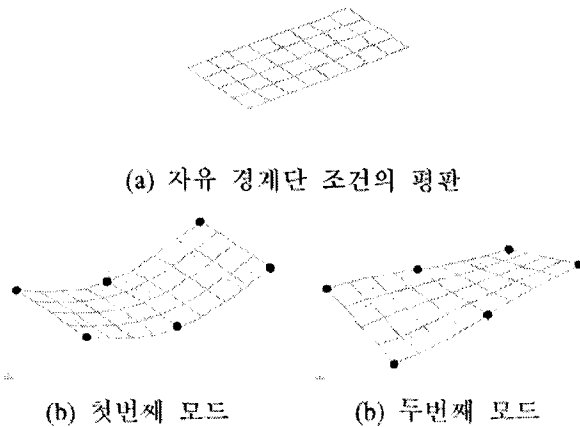


Figure 3 측정점 선정의 예 (ROOF STRUCTURE).

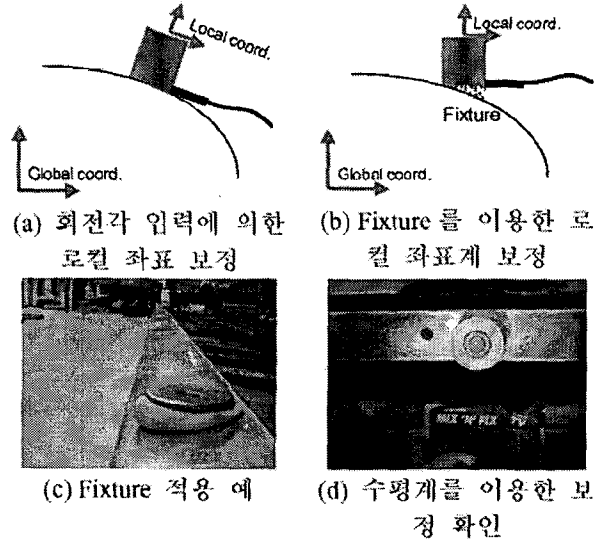


Figure 4 측정점의 로컬좌표 보정 예

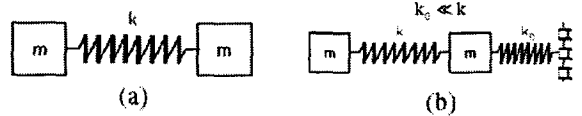


Figure 5 (a) 자유 경계조건, (b) 유연한 스프링에 의한 지지

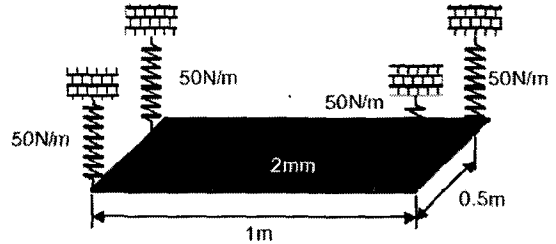


Table 2 평판의 고유진동수 비교

($f_{RIGID,MAX} = 1.3862\text{Hz}$)

Mode no.	Free Free B. C.	Flexible Spring	Error (%)
	Natural Frequency (Hz)		
1	10.434	10.548	1.0926
2	12.924	13.094	1.3154
3	28.486	28.583	0.3335
4	29.008	29.038	0.1034

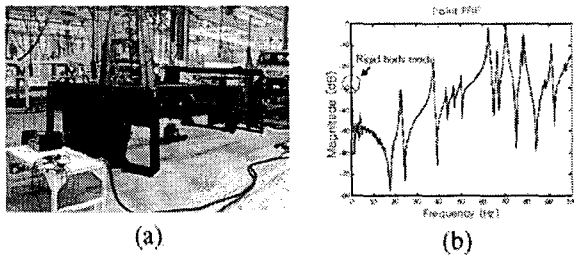


Figure 7
(a) FRONT CHASSIS 지지조건 및 (b) Point FRF

2.3 구조물의 가진

가진기는 가진력이 원하는 지점과 방향으로 가해질 수 있도록 부착되어야 한다. 가진력을 측정하기 위한 힘 센서는 구조물에 직접, 혹은 가능한 한 구조물에 가까이 설치되어야만 구조물이 가진되는 실제의 힘이 측정될 수 있다. 일반적으로 한 방향의 힘만 측정할 수 있는 힘 센서가 많이 사용되므로, 모드해석 실험 시 구조물을 힘 측정 방향으로만 가진하는 것은 매우 중요하다. 만일 그렇지 못하면 측정되지 않은 힘도 구조물을 가진하게 되므로 정확한 FRF 를 측정할 수 없게 된다. 따라서, 구조물은 가진 지점에서 회전이나 횡적 구속력을 갖지 않고 다른 5 자유도의 진동에 대해 자유로워야 한다. 이를 위해서 가진기를 구조물에 직접 연결하지 않고 가진봉(stinger)을 통하여 구조물에 연결한다. 가진봉은 낮은 횡적 강성 그리고 높은 축강성을 갖고 있어서 가진 방향을 제외한 다른 5 자유도 방향으로의 힘은 전달하지 않게 한다. 가진기가 설치되고 나면, 관심주파수 영역내에 충분한 힘 에너지가 공급되는지 확인해야 한다. 만일 구조물과 가진기의 상호작용 또는 가진봉의 공진 등으로 인하여 관심 주파수 내에서 충분히 가진되지 않으면 가진봉을 교체하거나 또는 가진점을 옮겨야 할 것이다.

구조물의 크기가 커지거나 연결부분이 많아지면, 한 점 가진만으로는 전체 구조물에 가진 에너지를 충분히 전달시킬 수 없게 되므로, 버스차체와 같은 대형 구조물인 경우에는 여러 지점을 동시에 가진하는 방법을 사용하는 것이 바람직하다. 다점 가진 실험을 하면 구조물 전체에 충분한 에너지를 공급할 수 있고, 일정한 출력잡음에 대한 신호의 영향이 증가하므로, 더 많은 지점에서 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있다. 또 가진점이 관심 모드의 노드점(nodal point)일 경우, 그 모드는 가진을 할 수 없게 되는데, 여러 지점에서 가진하면 이러한 가능성을 줄여준다.⁽⁷⁾ 다점 가진 실험에서 가진 지점은 서로 멀리 떨어질수록 좋다. 이렇

게 함으로써 구조물 전체를 울고루 가진할 수 있고 가진기 사이의 상호작용을 줄여준다. Fig. 8 은 2 개의 가진기를 설치한 예이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 두 가진기의 위치는 최대한 멀리 떨어져 있다. 또 관심주파수 영역내의 전체 모드들이 가진될 수 있도록 가진 방향을 달리하였다.

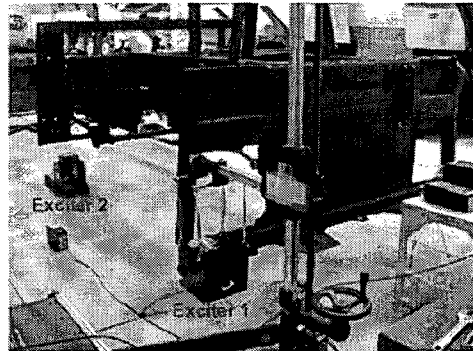


Figure 8 구조물 다점(2 점) 가진 예 (FRONT CHASSIS)

2.4 모드 매개변수 규명

2.4.1 모드 매개변수 규명 방법(curve-fitter)

모드 매개변수 규명은 측정된 주파수응답함수들로부터 모드 매개변수를 추출하는 과정으로 그 방법은 크게 SDOF, 시간 영역 MDOF, 주파수 영역 MDOF 커브 피팅(curve fitting) 방법으로 나눌 수 있다. SDOF 방법은 경 중첩된 모드를 갖는 시스템에 사용되며 선택된 주파수 범위내에서 SDOF 시스템으로 가정한다. 계산에 필요한 소요 시간은 매우 적지만 계산된 결과의 신뢰성은 떨어진다. 일반적으로 실험 장치가 올바르게 구성되었는지 또는 센서가 올바르게 작동하는지 검토하는 단계에서 많이 사용된다. 중첩된 모드 규명에 사용되는 방법은 시간 영역 MDOF 방법과 주파수 영역 MDOF 방법이다. 특히, 시간 영역 MDOF 방법은 가장 널리 쓰이는 방법으로 5% 이내의 경감쇠(lightly damped) 구조물에 많이 쓰인다. 주파수 영역 MDOF 방법은 5% 이상의 감쇠가 큰 구조물에서 정확한 결과를 보인다. 본 연구의 대상 구조물은 1% 이내로 감쇠가 매우 작으므로 시간 영역 MDOF 방법을 사용하여 모드 매개 변수를 추출하였다.

2.4.2 규명된 모드 매개변수 검증(validation)

규명된 모드 매개변수를 검증할 때 가장 많이 쓰이는 방법은 실험에서 측정된 FRF 와 합성된(synthesized or reconstructed) FRF 를 비교하는 것이다. 합성된 FRF 는 추출된 모드 매개변수를 이용하여 아래와 같이 FRF 를 재 생성한 것이다.

$$[H(j\omega)]_{N_o \times N_i} = \sum_{r=1}^{N_m} \left(\frac{\{\psi\}_r \langle L \rangle_r}{(j\omega - \lambda_r)} + \frac{\{\psi\}_r^* \langle L \rangle_r^*}{(j\omega - \lambda_r^*)} \right) + [UR] + \frac{[LR]}{\omega^2}$$

N_o : number of outputs

N_i : number of inputs

여기서,

[UR] : upper residual term matrix

[LR] : lower residual term matrix

일반적으로 합성된 FRF 와 측정된 FRF 사이의 오차가 작을수록 추출된 모드 매개변수는 정확하다고 할 수 있다. 특히, 공진점 주위에서 이러한 오차가 작아야 한다. Fig. 9 는 FRONT CHASSIS 의 측정된 FRF 와 합성된 FRF 를 비교한 것이다.

규명된 모드 형상은 선형 독립이어야 한다. 만일 그렇지 않다면, 측정점이 충분하지 않거나 규명된 모드 형상은 정확하지 않다고 할 수 있다. 이러한 선형 독립성을 검사하는 수단으로 가장 많이 사용되는 것은 다음과 같이 정의되는 MAC 이다.

$$MAC(\{\psi\}_r, \{\psi\}_s) = \frac{|\{\psi\}_r^* \{\psi\}_s|^2}{(\{\psi\}_r^* \{\psi\}_r)(\{\psi\}_s^* \{\psi\}_s)}$$

두 모드 $\{\psi\}_r, \{\psi\}_s$ 가 선형 독립이면, MAC 값은 0 에 가까운 값이다. 만일 두 모드가 동일하면 MAC 값은 1 이 된다.

LMS CADA-X 를 사용하면, 모드 매개변수 규명 뿐만 아니라, 위와 같은 방법으로 규명된 모드 매개 변수의 검증도 비교적 용이하게 할 수 있다.

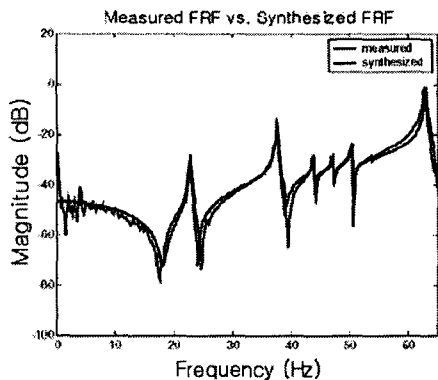


Figure 9 측정된 FRF 와 합성된 FRF (FRONT CHASSIS Point FRF)

3. 버스 FULL BIW 실험 모드 해석

본 장에서는 지면 관계 상 FULL BIW ASSEMBLY 에 대한 실험 모드 해석 결과만을 기술한다.

3.1 실험 모드 해석

FULL BIW 의 경우, 충분한 가진 입력을 주기 위해서 두 대의 가진기를 동시에 이용한 MIMO 모드 실험을 수행하였다. FULL BIW 의 질량은 3754Kg 이다. 구조물을 Crane 두 대를 이용하여 공중으로 띄웠으며 구조물의 정적 처짐량과 2.2.2 항에서 고려된 유연한 스프링으로 지지된 경우의 고유진동수 근사식을 사용해서 실험 목적에 부합되는 스프링을 제작하여 구조물과 Crane 사이에 설치하였다. 측정점의 개수는 총 158 개(node 1~130, node 201~208, X,Y,Z 방향)이고, 1 번 가진기 위치는 node 202(+z), 2 번 가진기 위치는 node 5(+y)로 하였다. Fig. 10, 11 은 각각 실험 셋업 장면과 측정점을 나타낸다. 실험 모드 해석을 통하여 총 11 개의 모드를 얻었으며, 실험에서 얻어진 고유진동수 및 감쇠비는 Tab. 3 에 정리되어 있다. Fig. 12 는 CADA-X 에서 모드 해석 시 전역 모드(global mode)를 쉽게 파악하기 위해 사용된, 측정된 모든 FRF 들의 합으로써 이를 바탕으로 11 개의 모드를 구하였다. 11 개의 실험 모드 형상들 간의 MAC 값은 Fig. 13 에 나타나 있다. Fig. 14 는 측정된 FRF 와 11 개의 모드로 합성된 FRF 를 비교한 것으로 모드 매개변수 추출이 잘 수행된 것을 알 수 있다.

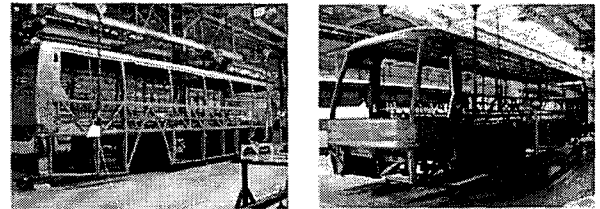


Figure 10 FULL BIW 실험 셋업 장면

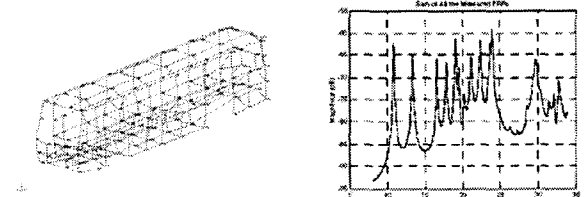


Figure 11 FULL BIW 측정점

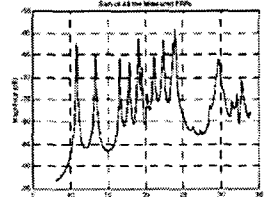


Figure 12 측정된 FRF 들의 합

Table 3 FULL BIW 실험 고유진동수 및 감쇠비

Mode No.	Natural Frequency (Hz)	Damping Ratio (%)
1	10.8316	0.2289
2	13.3248	0.3902
3	16.5579	0.1904
4	17.8581	0.3029
5	19.0745	0.2347
6	19.5571	0.2598
7	20.2644	0.7138
8	21.1656	0.3532
9	22.3728	0.3248
10	23.665	0.3404
11	24.0006	0.2346

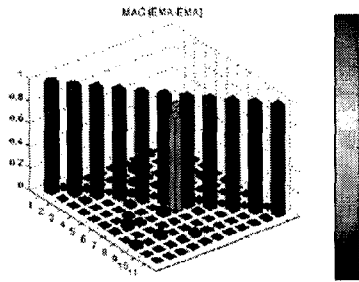


Figure 13 11 개 실험 모드형상 간의 MAC 값

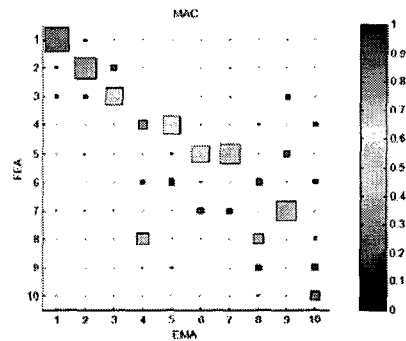


Figure 15 MAC 값 (FEA-EMA)

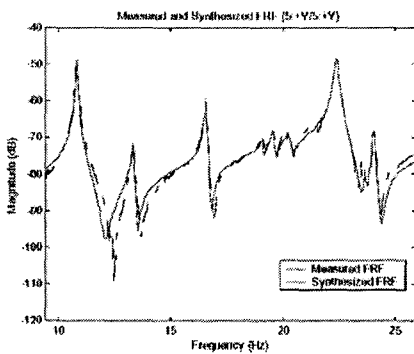


Figure 14 측정된 FRF 와 합성된 FRF

4. 결론

버스 차체 및 이의 부분 구조에 대하여 모드 해석 실험을 수행하였다. 대상 구조물은 자유단 경계조건이 될 수 있도록 유연한 스프링을 설계, 제작하였으며 구조물의 동특성에 따라 가진수와 가속도계 종류(1축 또는 3축)를 달리하여 FRF 를 측정하였다. 감쇠가 작은 구조물에 적합한 시간영역 MDOF 커브 피팅 방법을 사용하여 모드 매개 변수를 규명하였으며, 규명된 모드 매개변수로부터 재 합성된 FRF 와 측정된 FRF 를 비교, 모드의 상호 독립성을 조사하여 실험 결과의 타당성을 검증하였다.

후기

본 연구는 현대자동차㈜ 및 국가지정연구사업 “진동 저감을 위한 동특성 변경기술(M1-0001-00-0139)의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) 소음 및 진동제어 연구센터, 2002, “모드해석 (제 20 회) : 이론, 시험기술 및 응용”, 한국과학기술원
- (2) Ewins, D. J., 1984, “Modal Testing : Theory and Practice”, Research Studies Press Ltd.
- (3) McConnell, K. G., 1995, “Vibration Testing : Theory and Practice”, John Wiley & Sons
- (4) Heylen, W., Lammnes, S., and Sas, P., 1997, “Modal Analysis Theory and Testing”, Katholieke Universiteit Leuven
- (5) Maia, N. M. M. and Silva, J. M. M., 1997, “Theoretical and Experimental Modal Analysis”, Research Studies Press Ltd.
- (6) LMS, 1996, “LMS CADA-X User manual : Modal Analysis Revision 3.4”, LMS International
- (7) 장한기, 1989, “다점 가진에 의한 실험적 모우드 해석”, 한국과학기술원 석사학위논문

3.2 초기 유한 요소 모델의 해석결과와의 비교 (correlation)

실험 모드 해석(EMA)을 통해 얻어진 결과를 FULL BIW 의 초기 유한 요소모델의 해석결과 (FEA)와 비교하여 초기 유한 요소모델의 신뢰도를 검토해 보았다. 고유 진동수 비교는 Tab. 4 에, FEA 와 EMA 의 모드형상 간의 MAC 값은 Fig. 15 에 나타나있다. 고유진동수 비교 및 MAC 값을 통해 관심 영역인 저차 모드에서, 초기 유한 요소 모델의 해석결과와 실험 모드 해석 결과가 잘 부합되는 것을 알 수 있다.

Table 4 고유진동수 비교

Mode no.	Natural Frequency (Hz)	
	Finite Element Model	Experiment
1	12.9297	10.8318
2	13.9901	13.3248
3	15.4575	16.5579
4	19.4428	17.8581
5	20.2614	19.0745
6	23.2855	19.5571
7	23.8345	20.2644
8	25.7011	21.1656
9	27.676	22.3728
10	30.4412	23.655