

# 탄성지지된 구조물의 충격 햄머 실험에서 질량선의 개선을 통한 향상된 강체 특성 규명법

## Identification of Rigid Body Properties of the Mounted Structure with Improved Mass-Lines from Impact Hammer Tests

안세진\*·정의봉\*\*·황대선\*

Se Jin Ahn, Weui Bong Jeong and Dae Sun Hwang

**Key Words** : Rigid Body Properties(강체특성), Mass-Line(질량선), Frequency Response Function(주파수응답함수), Rigid Body Modes(강체모드)

### ABSTRACT

There are many researches to identify the rigid body properties from the mass-line obtained by impact hammer testing. The correct rigid body properties of the structure may be estimated if the mass-line of the structure could be obtained exactly. When the structure is mounted by elastic materials, the mass-line cannot be read correctly from the impulse response spectrum. The reason is due to the effects of rigid body modes of mounted structure. In this paper, the effects of rigid body modes of mounted structure to the mass-line are discussed and the method to remove these effects is also presented.

### 1. 서론

구조물의 강체 특성인 질량, 질량중심, 관성모멘트는 운동역학에서 뿐만 아니라 구조물의 진동저감을 위해 중요한 인자들이기 때문에 여러 가지 방법으로 강체 특성을 구하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 그 중에서 힘에 대한 가속도의 주파수 응답 함수인 액셀러런스(accelerance)가 강체모드 보다 충분히 높은 주파수 영역에서 일정한 값을 갖는 질량선(mass line)을 이용하는 방법이 일반화되어 있다. 그러나 일반적으로 주파수 응답 함수로부터 추출한 질량선 값은 강체모드의 영향과 탄성모드의 영향을 동시에 받게 되어 오차를 갖게 되며 주파수에 따라 그 값이 변화하기 때문에 정확한 값을 취하기 어렵다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 한다. 강체모드와 탄성모드가 주파수 응답 함수의 질량선에 미치는 오차원인을 분석하고 정확한 질량선을 추출하기 위한 방안을 제시한다. 제시된 이론을 바탕으로 다 자유도계에 대해서 시뮬레이션하여 오차가 제거된 질량선 값으로 정확한 강체 특성을 규명할 수 있음을 보이고자 한다.

### 2. 질량선의 오차 원인

2 자유도계 모델을 이용하여 질량선의 오차 원인을 확인하고 해결책을 살펴본다. 그리고 다 자유도계로 확장하여 살펴본다.

#### 2.1 2 자유도계 모델

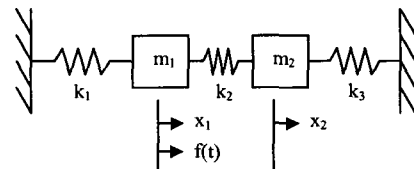


Fig. 1 Model of 2 DOF

강체모드와 탄성모드를 동시에 갖는 가장 간단한 모델로 Fig. 1 과 같은 2 자유도계를 고려한다.  $k_1$  과  $k_3$  는 지지계의 강성이고  $k_2$  는 구조물의 탄성을 나타내기 위한 강성이다.  $k_2$  의 값이  $k_1, k_3$  보다 상대적으로 크다고 가정하면 위의 모델은 강체모드와 탄성모드를 갖게 된다. Fig. 1 모델에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2+k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

\* 부산대학교 기계설계공학과 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부

E-mail : wbjeong@pusan.ac.kr

Tel : (051) 510-2337, Fax : (051) 517-3805

충격 가진 신호  $f(t)$ 는 Fig. 2 에서와 같은 half sine 파의 신호로 다음식과 같이 가정한다.[1]

$$f(t) = \begin{cases} F_0 \sin \omega_0 t, & 0 \leq t \leq t_0 \\ 0, & t_0 \leq t \end{cases} \quad (2)$$

여기서,  $\omega_0 = \pi/t_0$  이다.  $t_0$  는 충격 가진 신호의 duration time 으로  $0 \leq t \leq t_0$  시간동안의 가속도 응답 신호는 과도 신호가 된다.

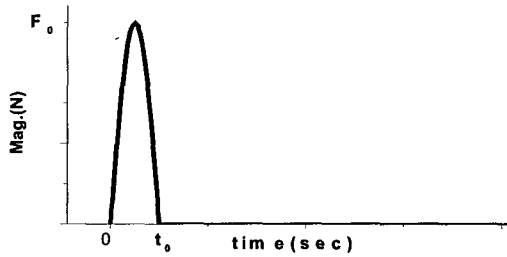


Fig. 2 Time data of half-sine force signal

초기조건을  $x_1(0)=0, \dot{x}_1(0)=0, x_2(0)=0, \dot{x}_2(0)=0$  으로 가정하면 질점 1 의 가속도는  $0 \leq t \leq t_0$  에서 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{a_1(t)}{F_0} &= \sum_{i=1}^2 \frac{(\phi_{1i})^2}{1 - \left(\frac{\omega_{ni}}{\omega_0}\right)^2} \sin \omega_0 t - \sum_{i=1}^2 \frac{\frac{\omega_{ni}}{\omega_0} (\phi_{1i})^2}{1 - \left(\frac{\omega_{ni}}{\omega_0}\right)^2} \sin \omega_{ni} t \quad (3) \\ &= P_1 \sin \omega_0 t + C_1 \sin \omega_{n1} t + C_2 \sin \omega_{n2} t \\ &= a_p(t) + a_h(t), \quad 0 \leq t \leq t_0 \end{aligned}$$

여기서,  $\omega_{ni}$  은  $i$  차 비감쇠 고유 진동수이다. 식 (3)의 첫번째 항은 충격 가진력에 대한 특수해 (particular solution)로 구하고자 하는 질량선의 정보를 포함하고 있다. 그러나 식(3)의 두번째 항은 초기조건에 의하여 결정되는 제차해(homogeneous solution)로 질량선을 틀리게 하는 값이다.

식(3)에서 가진 주파수  $\omega_0$  와 동일한 주파수를 갖는 특수해의 진폭  $P_1$  를 추출하기 위해 다음과 같이 최소자승법을 사용한다.

$$\begin{bmatrix} \sin \omega_0 t_1 & \sin \omega_{n1} t_1 & \sin \omega_{n2} t_1 \\ \sin \omega_0 t_2 & \sin \omega_{n1} t_2 & \sin \omega_{n2} t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin \omega_0 t_i & \sin \omega_{n1} t_i & \sin \omega_{n2} t_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{F_0} \begin{bmatrix} a_1(t_1) \\ a_1(t_2) \\ \vdots \\ a_1(t_i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $t_i = i\Delta t (i=1, \dots, N)$  이며,  $\Delta t$  는 샘플링 시간이다.

식(4)로부터 구해진 진폭  $P_1$  은 다음식

$$P_1 = \sum_{i=1}^2 \frac{(\phi_{1i})^2}{1 - \left(\frac{\omega_{ni}}{\omega_0}\right)^2} = \sum_{i=1}^2 \frac{S_i}{1 - \left(\frac{\omega_{ni}}{\omega_0}\right)^2} \quad (5)$$

과 같이 다시 쓸 수 있다. 여기서, 탄성지지된 구조물의 고유진동수  $\omega_{ni}$  는 주파수 응답 함수로부터 쉽게 알 수 있지만, 고유모드  $\phi_{1i}$  는 직접 구할 수 있는 값이 아니므로 분자항을 다른 미지수  $S_i$  로 치환한 것이다.

가진 주파수  $\omega_0$  를 다르게 하여 2 번 측정하여 다음과 같은 방정식

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{n1}}{\omega_{01}}\right)^2} & \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{n2}}{\omega_{01}}\right)^2} \\ \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{n1}}{\omega_{02}}\right)^2} & \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{n2}}{\omega_{02}}\right)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

으로부터  $S_1, S_2$  를 구하면, 질량선은

$$S_1 = \frac{1}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

로 구해진다.

예를 들어  $m_1=1\text{kg}, m_2=1\text{kg}, k_1=k_3=10\text{kN/m}, k_2=5\text{MN/m}$  인 시스템에 대해 적용한다. 시스템의 고유 진동수는 50.3Hz, 713.5Hz 이다. 시스템은 강체모드(50.3Hz)와 탄성모드(713.5Hz)의 거동을 나타낼 것이다. 가진 주파수는 200Hz, 400Hz 로 가진한다.

주파수가 200Hz ( $t_0 = 0.005 \text{ sec}$ )이고 크기 ( $F_0$ ) 가 1 인 half sine 파 형태의 가진력이 가진 될 때 가진력과 질점 1 의 가속도 응답은 Fig. 3 과 같이 나타난다.

한편, 충격 가진 후의 자유 진동 가속도는

$$\begin{aligned} \frac{a_1(t)}{F_0} &= \sum_{i=1}^2 \phi_{ki} \frac{\omega_{ni} \omega_0 \phi_{1i}}{\omega_{ni}^2 - \omega_0^2} \left\{ (1 + \cos \omega_{ni} t_0) \sin \omega_{ni} t \right. \\ &= a_f(t), \quad t \geq t_0 \end{aligned} \quad (8)$$

이다. FFT 계측기에서 질량선을 구하는 기존의 방

법은 충분히 긴 시간동안 가속도 신호를 획득하여 주파수 응답 함수(엑셀러런스)를 구하는 것이다. 그러므로 Fig. 3 의 가속도 신호  $a(t)$ 는 식(3)의 특수해  $a_p(t)$ , 제차해  $a_h(t)$ 와 자유 진동해  $a_f(t)$ 를 합한 것으로 다음과 같이 표현되어진다.

$$a(t) = \begin{cases} a_p(t) + a_h(t) & , 0 \leq t \leq t_0 \\ a_f(t) & , t \geq t_0 \end{cases} \quad (9)$$

Fig. 4 는 가진력 신호를 푸리에 변환한 것이고 Fig. 5 는 식(9)의 가속도 신호를 분해하여 표현한 것이고, Fig. 6 은 세 가속도의 합에 의한 주파수 응답 함수를 나타내었다. 주파수 응답 함수에서 정확한 질량선 값을 읽을 수 없음을 알 수 있다.

Table 1 은 주파수 응답 함수를 이용하는 기존의 방법과 제안하는 방법에 의한 질량선 추정 결과를 나타낸다. 기존의 방법은 질량선이 수평하지 않고 정확한 값을 읽을 수 없지만 제시하는 방법은 정확한 질량선을 추정할 수 있음을 알 수 있다.

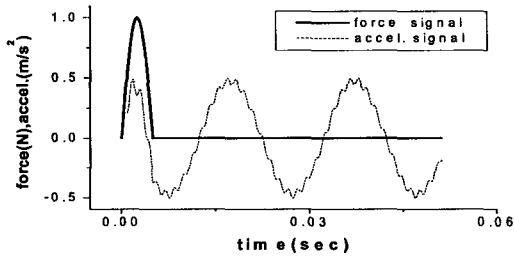


Fig. 3 Time data of force and acceleration signal

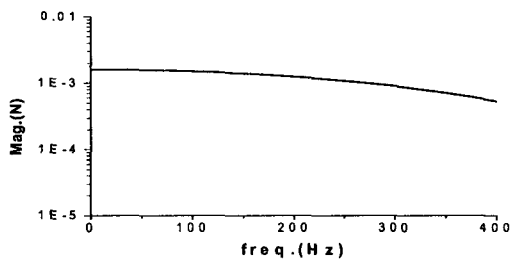


Fig. 4 Fourier spectrum of force signal

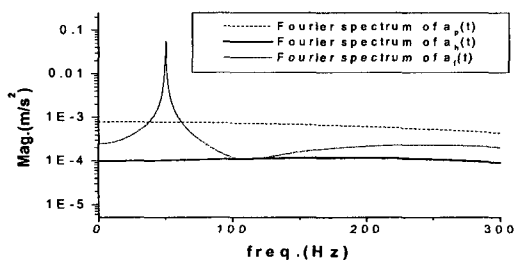


Fig. 5 Fourier spectrum of acceleration signal

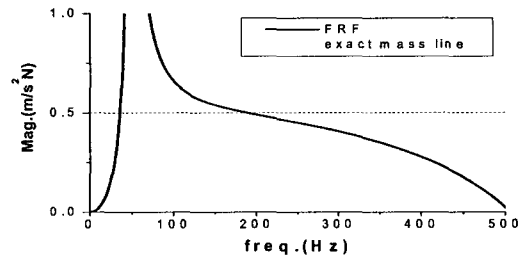


Fig. 6 Frequency response function estimated by conventional fourier transform method

Table 1 Mass lines [m/s<sup>2</sup> N]

Exact value	Proposed method	Conventional method by FFT
0.500	0.500	0.279~0.660

## 2.2 다 자유도계 모델

다 자유도계에서 식(3)과 같은  $0 \leq t \leq t_0$  시간에서의 응답은 2 자유도계와 마찬가지로  $j$  점 가진에 대한  $k$  점 가속도는

$$\begin{aligned} \frac{a_k(t)}{F_0} &= \sum_{i=1}^m \frac{\phi_{ki}\phi_{ji}}{1 - \left(\frac{\omega_{ni}}{\omega_0}\right)^2} \sin \omega_0 t - \sum_{i=1}^m \frac{\omega_{ni} \phi_{ki}\phi_{ji}}{\omega_0 \left(1 - \left(\frac{\omega_{ni}}{\omega_0}\right)^2\right)} \sin \omega_{ni} t \quad (10) \\ &= P_k \sin \omega_0 t + \sum_{i=1}^m C_{ki} \sin \omega_{ni} t \quad , 0 \leq t \leq t_0 \end{aligned}$$

이므로 식(4)와 마찬가지로

$$\begin{bmatrix} \sin \omega_0 t_1 & \sin \omega_{n1} t_1 & \cdots & \sin \omega_{nm} t_1 \\ \sin \omega_0 t_2 & \sin \omega_{n1} t_2 & \cdots & \sin \omega_{nm} t_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sin \omega_0 t_i & \sin \omega_{n1} t_i & \cdots & \sin \omega_{nm} t_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_k \\ C_{k1} \\ \vdots \\ C_{km} \end{bmatrix} = \frac{1}{F_0} \begin{bmatrix} a_k(t_1) \\ a_k(t_2) \\ \vdots \\ a_k(t_i) \end{bmatrix} \quad (11)$$

를 구성하여 최소자승법으로 진폭  $P_k$ 를 추출할 수 있고,  $\omega_0$ 를  $m$  번 달리하면서 계측하면, 다음식

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{n1}}{\omega_{01}}\right)^2} & \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{n2}}{\omega_{01}}\right)^2} & \cdots & \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{nm}}{\omega_{01}}\right)^2} \\ \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{n1}}{\omega_{02}}\right)^2} & \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{n2}}{\omega_{02}}\right)^2} & \cdots & \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{nm}}{\omega_{02}}\right)^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{n1}}{\omega_{0m}}\right)^2} & \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{n2}}{\omega_{0m}}\right)^2} & \cdots & \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{nm}}{\omega_{0m}}\right)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{k1} \\ S_{k2} \\ \vdots \\ S_{km} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{k1} \\ P_{k2} \\ \vdots \\ P_{km} \end{bmatrix} \quad (12)$$

으로부터 식(5)의 분자항  $S_{ki}(i=1,2,\dots,m)$ 을 구할 수 있다. 그리고 질량선은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\text{mass line} \left( \frac{a_k}{f_j} \right) = \sum_{i=1}^l S_{ki} \quad (13)$$

여기서,  $l$ 은 탄성모드를 제외하고 강체모드만을 고려함을 의미한다. 하지만 현실적으로 강체라고 가정되는 물체의 주파수 응답 함수를 살펴보면 일반적으로 강체모드의 피크가 모두 발생하는 경우(6개)는 드물다. 결국 주파수 응답 함수에서 관심영역 내에 있는 피크의 개수 만큼 가진 주파수를 달리하면서 측정해야 한다. 그리고 측정된 가속도에서 각 가진 주파수와 동일한 주파수의 영향을 추출하고 피크의 개수 만큼의 방정식을 풀어야 한다.

### 3. 시뮬레이션

다 자유도계 모델을 이용하여 본 연구에서 제안하는 방법과 주파수 응답 함수를 이용하는 방법으로 질량선 값을 추정하고 강체특성을 규명한다.

#### 3.1 모델 선정

Fig. 8은 다 자유도계의 강체모델을 나타낸다. 질량 중심에 질량과 강성을 갖는 임의의 물체가 놓여있다고 가정한다. Fig. 8의 모델은 주파수 응답 함수에서 6개의 강체모드와 3개의 탄성모드를 갖는다. 따라서 주파수 응답 함수를 이용하여 질량선 값을 추출하기가 더욱 어려워진다. Fig. 8과 같은 모델을 이용하여 시뮬레이션을 하였다. ①, ②, ③은 가진점이고, A, B, C는 응답점이다. 치수는 다음과 같다. 아래에 있는 box형 강체는 가로, 세로, 높이가 각각 0.3, 0.2, 0.2m 이고 두께 0.01m 인 속이 비어있는 강체이고, 위에 있는 강체는 길이가 각각 0.1, 0.08, 0.08m 이다. 각각의 질량은 23kg 과 5kg 이다. 중심에 있는 물체의 질량은 5kg 이다. 강성은 바닥의 4 군데에 3 방향으로 동일한 강성을 사용하였다.  $k_x=60\text{kN/m}$ ,  $k_y=40\text{kN/m}$ ,  $k_z=200\text{kN/m}$  이다. 중심에 있는 강성은  $k_x=k_y=k_z=10\text{MN/m}$  이다. Table 2은 시뮬레이션에서 사용된 모델의 고유 진동수이다.

Table 2. Natural frequency of multi-dof model [Hz]

1st	9.4	6th	39.0
2nd	12.1	7th	244.4
3rd	19.0	8th	244.4
4th	23.9	9th	244.6
5th	28.1		

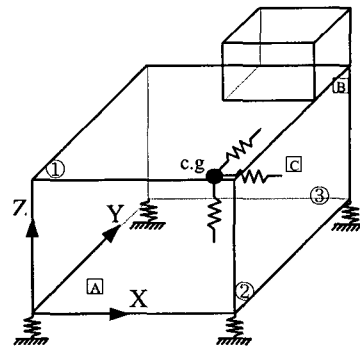


Fig. 8 Multi-degree of freedom model

#### 3.2 질량선 값 추정

Fig. 9는 Fig. 8의 모델을 이용하여 ①점을 가진하고 B점에서의 y 방향의 주파수 응답 함수를 나타낸다. 기존의 FFT 방법에 의한 주파수 응답 함수(엑셀러런스)를 Fig. 9에 나타낸다. Fig. 10은 Fig. 9의 점선 부분을 확대하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 질량선을 정확히 읽을 수 없음을 알 수 있다.

한편, 제시하는 방법에서는 Fig. 9에서 알 수 있듯이 강체모드가 4개 탄성모드가 1개의 피크가 있으므로 피크의 개수  $m=5$ 로 가정하여 가진 주파수  $\omega_0$ 를 5회 달리하며 시뮬레이션한다. 가진 주파수는 60, 70, 73, 80, 88, 65Hz이다. 여기서 강체모드 피크의 영향을 받은 4개의 분자 부분의 합을 질량선 값으로 한다.

Table. 4에서 이론, 본 연구에서 제안하는 방법으로 3개의 가진점, 3개의 응답점, 3방향 27개의 가속도에 대해 추정된 질량선 값들을 비교한다. Table. 5에서는 주파수 응답 함수에서 구한 질량선 값들을 비교한다. Table 4에서 이론값과 비교할 때 본 연구에서 제안하는 방법으로 추출한 질량선 값이 이론값과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 주파수 응답 함수에서 추출한 질량선 값은 이론값과 상당한 오차를 갖고 있음을 Table 5에서 확인할 수 있다.

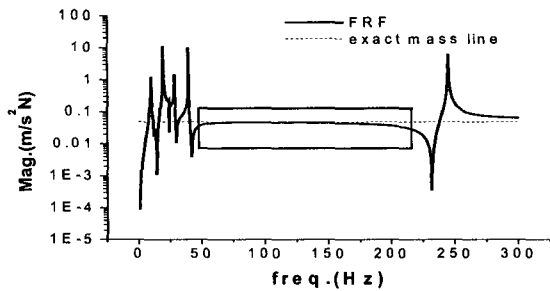


Fig. 9 Frequency response function (multi-dof)

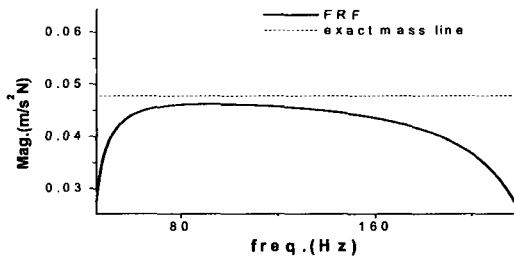


Fig. 10 Box region in Fig. 9

Table 4 Mass lines obtained by proposed method [m/s<sup>2</sup> N]

	Exact value	Proposed method	Error (%)
1Ax	-0.0420	-0.0422	0.6
1Ay	0.0478	0.0474	-0.9
1Az	0.0261	0.0259	-1.0
1Bx	0.0315	0.0314	-0.1
1By	-0.0065	-0.0068	4.8
1Bz	-0.0117	-0.0115	-1.2
1Cx	0.0561	0.0560	-0.2
1Cy	-0.0257	-0.0262	1.9
1Cz	-0.0240	-0.0238	-0.7
2Ax	-0.0707	-0.0705	-0.2
2Ay	0.0216	0.0216	0.0
2Az	0.0180	0.0182	0.7
2Bx	0.0055	0.0057	3.0
2By	-0.0300	-0.0299	-0.1
2Bz	-0.0274	-0.0275	0.4
2Cx	-0.0282	-0.0280	-0.6
2Cy	-0.0103	-0.0102	-0.1
2Cz	-0.0106	-0.0106	0.1
3Ax	-0.0289	-0.0287	-0.5
3Ay	-0.0066	-0.0066	-0.3
3Az	0.0081	0.0082	1.1
3Bx	-0.0286	-0.0284	-0.6
3By	0.0124	0.0125	0.6
3Bz	-0.0178	-0.0181	1.6
3Cx	-0.0582	-0.0580	-0.3
3Cy	0.0153	0.0154	0.2
3Cz	-0.0030	-0.0030	-0.6

### 3.3 강체특성 규명 결과

추정된 질량선 값을 이용하여 강체특성을 규명한다. 질량선을 이용한 강체특성 규명은 참고문헌 [2]을 이용하였다. Table 6에서 Table 4의 질량선 값을 이용하여 규명한 강체특성을 이론값과 비교하였다.

Table 7에는 Table 5의 질량선 값을 이용하여 규명한 강체특성을 나타내었다.

본 연구에서 제안하는 방법으로 규명한 강체특성은 이론값과 잘 일치하는 것을 Table 6에서 확인할 수 있고, 주파수 응답 함수를 이용하는 방법은 큰 오차를 갖고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Mass lines [m/s<sup>2</sup> N]

Exact value	Proposed method	Conventional method by FFT
0.0478	0.0474	0.0324~0.0463

Table 5 Mass lines obtained by conventional method [m/s<sup>2</sup> N]

FRF					
90Hz	Error (%)	150Hz	Error (%)	210Hz	Error (%)
-0.0426	1.4	-0.0423	0.7	-0.0422	0.4
0.0463	-3.3	0.0444	-7.8	0.0324	-47.5
0.0282	7.3	0.0268	2.7	0.0265	1.5
0.0321	1.9	0.0317	0.8	0.0316	0.3
-0.0087	25.9	-0.0102	36.7	-0.0220	70.5
-0.0104	-11.8	-0.0113	-2.9	-0.0115	-1.1
0.0639	12.3	0.0586	4.3	0.0573	2.1
-0.0336	23.4	-0.0313	17.7	-0.0422	39.0
-0.0264	9.0	-0.0248	3.2	-0.0244	1.8
-0.0747	5.5	-0.0690	-2.5	-0.0560	-26.2
0.0231	6.4	0.0221	2.2	0.0218	1.0
0.0207	12.9	0.0189	4.6	0.0184	2.1
0.0084	34.3	0.0095	42.0	0.0212	74.1
-0.0311	3.5	-0.0304	1.3	-0.0302	0.7
-0.0318	13.7	-0.0288	4.9	-0.0281	2.4
-0.0327	14.0	-0.0265	-6.2	-0.0135	-108.6
-0.0084	-21.9	-0.0097	-5.2	-0.0100	-2.2
-0.0112	5.6	-0.0108	2.2	-0.0107	1.2
-0.0308	6.3	-0.0265	-9.3	-0.0139	-108.2
-0.0061	-9.6	-0.0065	-2.3	-0.0066	-0.8
0.0095	15.4	0.0085	5.4	0.0083	2.3
-0.0271	-5.3	-0.0251	-13.8	-0.0131	-118.1
0.0130	4.8	0.0126	1.7	0.0125	0.8
-0.0215	17.0	-0.0190	6.1	-0.0184	2.9
-0.0644	9.6	-0.0571	-1.9	-0.0438	-32.8
0.0191	19.7	0.0165	7.0	0.0159	3.4
-0.0028	-5.7	-0.0030	-0.9	-0.0030	-0.3

**Table 6** Rigid body properties estimated by proposed method

	Exact value	New method	Error(%)
$x_G[m]$	0.1679	0.1673	-0.3
$y_G[m]$	0.1107	0.1107	0.0
$z_G[m]$	0.1250	0.1248	-0.1
$I_{Gx}[kg\ m^2]$	0.3439	0.3461	0.6
$I_{Gy}[kg\ m^2]$	0.4912	0.4886	-0.5
$I_{Gz}[kg\ m^2]$	0.4255	0.4248	-0.2
$I_{Gxy}[kg\ m^2]$	0.1076	0.1074	-0.3
$I_{Gyz}[kg\ m^2]$	0.0824	0.0827	0.4
$I_{Gzx}[kg\ m^2]$	0.0730	0.0736	0.9

참고문헌

- (1) Rao,S.S., 1992, 기계진동학 2nd, Addison-Wesley, Inc
- (2) 안세진, 정의봉, 황대선, 2001, “자유경계 조건에서의 질량선에 의한 강체 특성 규명”, 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 745~749.
- (3) 류석주, 1995, “마운트 지지 구조물의 강체특성의 실험적 규명에 관한 연구, 공학석사 학위논문”, 부산대학교.

**Table 7** Rigid body properties estimated by conventional method

FRF					
90Hz	Error (%)	150Hz	Error (%)	210Hz	Error (%)
0.1683	0.2	0.1616	-3.9	0.1348	-24.6
0.1109	0.1	0.1083	-2.3	0.0981	-12.9
0.1276	2.0	0.1202	-4.0	0.0960	-30.3
0.3077	-11.8	0.3589	4.2	0.4837	28.9
0.4208	-16.7	0.4469	-9.9	0.3747	-31.1
0.4062	-4.7	0.4113	-3.4	0.3839	-10.8
0.1062	-1.3	0.1140	5.6	0.1414	23.9
0.0815	-1.1	0.0724	-13.9	0.0325	-153.9
0.0712	-2.5	0.0808	9.7	0.1159	37.1

4. 결론

- (1) 2 자유도계 모델의 주파수 응답 함수에서 주파수 값에 관계없이 일정한 값을 갖는 질량선의 존재 위치와 질량선 값을 추출할 때 발생하는 오차의 원인과 그 대책을 제시하였다.
- (2) 다 자유도계에 대해서도 2 자유도계에서의 이론을 적용하여 보았다.
- (3) 강체 및 탄성 모드를 갖는 다 자유도계 모델을 이용하여 시뮬레이션하여 보았다.
- (4) 본 연구에서 제안하는 방법으로 추출한 질량선 값과 규명한 강체특성은 주파수 응답 함수를 이용하여 구한 값 보다 작은 오차를 갖는 것을 확인할 수 있었다.
- (5) 기존의 질량선 값 추출 방법인 주파수 응답 함수를 이용하는 방법은 항상 오차를 갖고 있다는 것을 확인할 수 있었고, 오차가 배제된 질량선 값을 추출하는 새로운 방법을 제시하였다.