

# 자유경계 조건에서의 질량선에 의한 강체특성 규명 Identification of the Rigid Body Properties using the Mass-line of F.R.F. in Free-boundary Condition

안세진\*\* · 정의봉\* · 황대선\*\*  
Se Jin Ahn, Weui Bong Jeong, and Dae Sun Hwang

## ABSTRACT

The rigid body properties of a structure may be estimated easily if the mass-line of the structure could be taken exactly. However, the exact mass-line cannot be obtained experimentally. In the past years, the modal analysis for which the structure is mounted on the flexible supporter is frequently used to acquire the mass-line. Unfortunately, it is difficult not only to mount the structure but also to decouple the coupled 6 dof mode. If the structure is pended by very long and flexible rope to act free, the rigid-body modes influenced by the rope will be eliminated and the improved mass-line will be obtained. In this paper, the method using the mass-line of F.R.F. for rigid body in free-condition is suggested. The robustness of the suggested method was tested and verified numerically. The experimental results also showed a good agreement with the true value.

## 1. 서론

구조물의 강체특성(질량, 질량중심, 관성모멘트)은 운동역학에서 뿐만 아니라 구조물의 진동 저감을 위해 중요한 인자들이다. 특히 구조물의 강체특성을 이용하여 구조물을 적절히 지지(mounting) 하므로써 진동을 크게 줄일 수 있다. 강체특성을 규명하기 위한 방법으로는 해석모델을 이용한 방법과 실험에 의한 방법이 있다. 시험적인 방법 중에는 진자원리를 이용하는 방법과 탄성지지 된 구조물에서 얻은 주파수응답함수(F.R.F.)로부터 강체특성을 규명하는 방법이 이용되고 있다. 그 중에 F.R.F.를 이용하는 방법이 간편하고 경제적이기 때문에 많이 이용되고 있으나 탄성지지에 의한 구조물의 강체모드를 정확하게 규명하기 어려울 때는 만족할 만한 결과를 얻기 어려운 것이 사실이다.

본 연구에서는 구조물을 탄성지지하지 않고 길고 유연한 줄을 이용하여 매달아 구조물의 운동이 자유로운 상태가 되도록 한 다음, 충격(impact) 가진하여 얻은 F.R.F.(accelerance)를 이용하여 강체특성을 규명한다. 이렇게 하면 구조물의 강체모드가 배제되기 때문에 일정한 값만 가지는 수평한 직선의 F.R.F.를 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 일정한 값이 질량선(mass-line)이 된다. 이 질량선 값을 운동역학 방정식에 적용하면 간단한 실험으로 높은 정도의 강체특성 값들을 규명할 수 있다. 또한 정확하게 알 수 있는 구조물의 질

량을 직접 계량하여 입력함으로써 결과의 정확도를 더욱 높인다.

위와 같은 이론을 바탕으로 간단한 수학적인 모델과 시험모델에 적용하여 본 연구의 타당성을 검토하였다.

## 2. 질량선과 운동역학 방정식

### 2.1 구조물의 자유상태와 질량선

시험에서 구조물을 완전자유상태로 유지하기는 현실적으로 불가능하므로 Fig. 1과 같이 길고 유연한 줄을 이용하여 매달아 구조물이 자유롭게 거동할 수 있도록 하였다. Fig. 1과 같이 설치된 구조물에 임의점을 충격가진하고 다른 임의점에서 가속도를 측정하여 얻은 F.R.F.의 모양을 Fig. 2에 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 질량선이 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

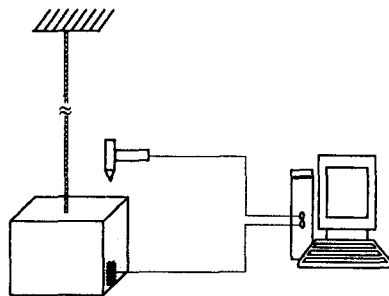


Fig. 1 Experimental setup for mass-line

\* 정회원, 부산대학교 기계공학부

\*\* 부산대학교 기계설계공학과 대학원

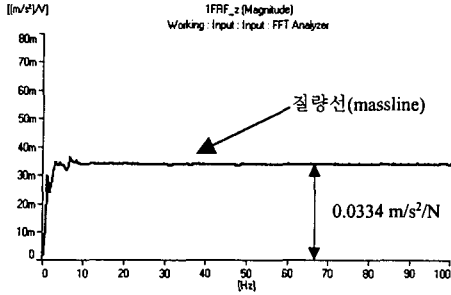


Fig. 2. Typical mass line for rigid body in free-condition

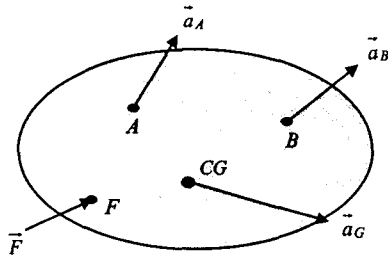


Fig. 3. Model for kinematic and dynamic equation

## 2.2 운동역학 방정식

Fig. 3에서 점 F( $x_F, y_F, z_F$ )는 가진점, 점 A( $x_A, y_A, z_A$ )와 점 B( $x_B, y_B, z_B$ )는 응답점이고 점 CG( $x_G, y_G, z_G$ )는 질량중심점을 나타낸다. 가진점 F에 힘  $\vec{F}$ 가 작용했을 때 응답점 A, B의 가속도를  $\vec{a}_A, \vec{a}_B$ 라 하면  $\vec{a}_A$ 와  $\vec{a}_B$ 의 관계는 식(1)과 같다.

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{\alpha} \times \vec{r}_{AB} \quad (1)$$

$$= \vec{a}_A + \hat{i}(\alpha_y r_z - \alpha_z r_y) + \hat{j}(\alpha_z r_x - \alpha_x r_z) + \hat{k}(\alpha_x r_y - \alpha_y r_x)$$

식(1)을 행렬 형태의 식으로 다시 나타내면 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{Bx} \\ a_{By} \\ a_{Bz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{Ax} \\ a_{Ay} \\ a_{Az} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & (z_B - z_A) & -(y_B - y_A) \\ -(z_B - z_A) & 0 & (x_B - x_A) \\ (y_B - y_A) & -(x_B - x_A) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\vec{a}_A$ 와  $\vec{a}_G$ 의 관계는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_{Ax} \\ a_{Ay} \\ a_{Az} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{Gx} \\ a_{Gy} \\ a_{Gz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & (z_A - z_G) & -(y_A - y_G) \\ -(z_A - z_G) & 0 & (x_A - x_G) \\ (y_A - y_G) & -(x_A - x_G) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

가진력  $\vec{F}$ 와 점 A에서의 가속도  $\vec{a}_A$ 의 관계는 식

(4)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} a_{Gx} \\ a_{Gy} \\ a_{Gz} \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} a_{Ax} \\ a_{Ay} \\ a_{Az} \end{bmatrix} - m \begin{bmatrix} 0 & (z_A - z_G) & -(y_A - y_G) \\ -(z_A - z_G) & 0 & (x_A - x_G) \\ (y_A - y_G) & -(x_A - x_G) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)를 다시 정리하면 식(5)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} - m \begin{bmatrix} a_{Ax} \\ a_{Ay} \\ a_{Az} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -m\alpha_x & m\alpha_y \\ m\alpha_x & 0 & -m\alpha_z \\ -m\alpha_y & m\alpha_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -m\alpha_x & m\alpha_y \\ m\alpha_x & 0 & -m\alpha_z \\ -m\alpha_y & m\alpha_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} \quad (5)$$

구조물의 질량중심점에서 모멘트  $\vec{M}_G$ 는 식(6)과 같이 나타내며 가진 전의 시험 구조물은 정지 상태이므로  $\vec{\omega}$ 는 '0'이다.

$$\vec{M}_G = \vec{H}_G = \begin{bmatrix} I_{Gx} & -I_{Gxy} & -I_{Gxz} \\ & I_{Gy} & -I_{Gyz} \\ sym & & I_{Gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} + \vec{\omega} \times \vec{H}_G \quad (6)$$

그리고  $\vec{M}_G$ 를 가진력  $\vec{F}$ 와의 관계로 나타내면 식(7)이 된다.

$$\vec{M}_G = \vec{r}_{GF} \times \vec{F} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ r_x & r_y & r_z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$= \hat{i}(r_y F_z - r_z F_y) + \hat{j}(r_z F_x - r_x F_z) + \hat{k}(r_x F_y - r_y F_x)$$

여기서  $\vec{r}_{GF}$ 는 질량중심점(CG)에서 가진점(F)로 향하는 거리 벡터이다. 이제 식(6)과 식(7)에 의해서 식(8)을 얻을 수 있다.

$$(y_F - y_G)F_z - (z_F - z_G)F_y = I_{Gx}\alpha_x - I_{Gxy}\alpha_y - I_{Gxz}\alpha_z$$

$$(z_F - z_G)F_x - (x_F - x_G)F_z = -I_{Gxy}\alpha_x + I_{Gy}\alpha_y - I_{Gyz}\alpha_z \quad (8)$$

$$(x_F - x_G)F_y - (y_F - y_G)F_x = -I_{Gxz}\alpha_x - I_{Gyz}\alpha_y - I_{Gz}\alpha_z$$

식(8)을 행렬 형태의 식으로 다시 나타내면 식(9)가 된다.

$$\begin{bmatrix} y_F F_z - z_F F_y \\ z_F F_x - x_F F_z \\ x_F F_y - y_F F_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & F_z & -F_y & \alpha_x & 0 & 0 & -\alpha_y & 0 & -\alpha_z \\ -F_z & 0 & F_x & 0 & \alpha_y & 0 & -\alpha_x & -\alpha_z & 0 \\ F_y & -F_x & 0 & 0 & 0 & \alpha_x & 0 & -\alpha_y & -\alpha_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \\ I_{Gx} \\ I_{Gy} \\ I_{Gz} \\ I_{Gxy} \\ I_{Gyz} \\ I_{Gxz} \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 2.3 강체 특성 규명 과정

실험으로 얻은 F.R.F.(A(ω)/F(ω):Acceleration)는 단위 가진력에 의해 발생하는 가속도응답의 크기를 나타내므로 이렇게 구해진 F.R.F.의 질량선은 구조물이 거동할 때 발생하는 가속도와 각가속도를 대표하는 값이 된다. 이러한 성질을 이용하여 다음의 과정에 의해 운동역학 방정식을 적용하면 구조물의 강체특성을 구할 수 있다.

**[step 1]** 1점 가진에 대한 2점 3방향 응답 F.R.F.의 질량선값( $a_{Ax}, a_{Ay}, a_{Az}, a_{Bx}, a_{By}, a_{Bz}$ )을 식(2)에 대입하면 가진에 의해 발생하는 구조물의 각가속도( $\vec{\alpha}$ )를 구할 수 있다. 2점 외에 응답 점을 추가하면 식(10)과 같이 최소자승법을 이용할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_{Bx}-a_{Ax} \\ a_{By}-a_{Ax} \\ a_{Bz}-a_{Ax} \\ a_{Cx}-a_{Ax} \\ a_{Cy}-a_{Ax} \\ a_{Cz}-a_{Ax} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & (z_B-z_A) & -(y_B-y_A) \\ -(z_B-z_A) & 0 & (x_B-x_A) \\ (y_B-y_A) & -(x_B-x_A) & 0 \\ 0 & (z_C-z_A) & -(y_C-y_A) \\ -(z_C-z_A) & 0 & (x_C-x_A) \\ (y_C-y_A) & -(x_C-x_A) & 0 \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

**[step 2]** [step 1]에서 구한 각 가속도( $\vec{\alpha}$ )와 기지의 질량값(m)을 식(5)에 대입하면 질량 중심점( $x_G, y_G, z_G$ )을 구할 수 있다. 이 때 가진점을 옮기거나 가진방향을 바꾸어가면서 시험한 질량선 값을 구하면 최소자승법을 이용할 수 있다.

**[step 3]** [step 1]과 [step 2]에서 구한 질량 중심점과 각 가속도를 이용하여 식(9)에서 질량중심에 관한 항을 제외한 식(11)에 적용하면 강체의 관성모멘트 및 관성적을 구할 수 있다. 여러 점 가진에 대한 각 가속도를 이용하면 최소자승법을 사용할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} (y_F-y_G)F_z - (z_F-z_G)F_y \\ (z_F-z_G)F_x - (x_F-x_G)F_z \\ (x_F-x_G)F_y - (y_F-y_G)F_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & 0 & -\alpha_y & 0 & -\alpha_z \\ 0 & \alpha_y & 0 & -\alpha_x & -\alpha_z & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_z & 0 & -\alpha_y & -\alpha_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Gx} \\ I_{Gy} \\ I_{Gz} \\ I_{Gxy} \\ I_{Gyz} \\ I_{Gxz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

## 3. 시뮬레이션

간단한 수학적인 모델에 대해 오차 없이 계산된 질량선 값을 이용하여 본 프로그램을 검증하고, 시험에서 발생할 수 있는 각종 오차를 고려하여 질량선 값에 오차가 혼입되었을 때 어느 정도의 오차를 가지는 강체특성 값을 추정하게 되는지를 시뮬레이션 해 본다. 즉 입력오차에 대한 결과의

민감도를 시뮬레이션으로 조사한다.

시뮬레이션에 사용되는 모델은 Fig. 4와 같고 3점의 가진점에 대한 3점의 3방향 응답, 즉 27개의 질량선 값을 이용한다. 여기서 가진점과 응답점은 실제로 측정 가능한 임의의 점으로 선정하였다.

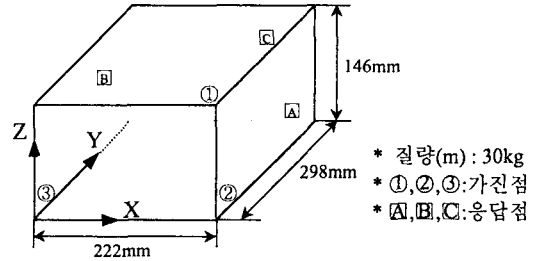


Fig. 4. Symmetric model for simulation and experiment

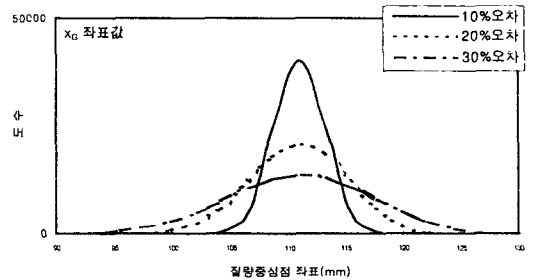


Fig. 5. Probability of estimation for mass center

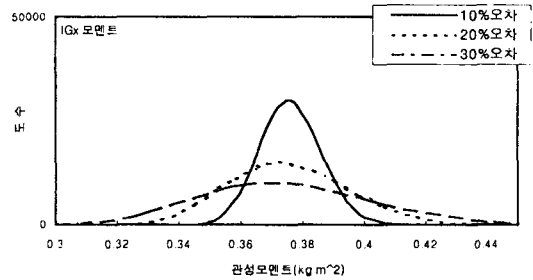


Fig. 6. Probability of estimation for inertia

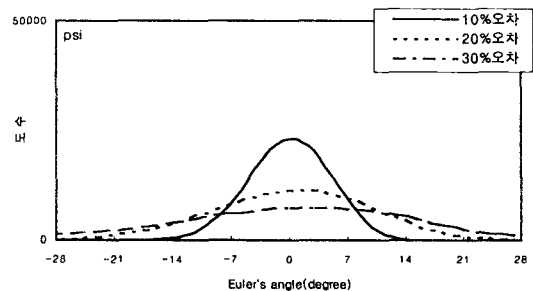


Fig. 7. Probability of estimation for Euler's angle

**Table 1** Results of typical simulation case

	Exact	10%	오차	20%	오차	30%	오차
$x_G(\text{mm})$	111.0	113.2	2.0	113.3	2.1	114.9	3.5
$y_G(\text{mm})$	149.0	147.5	-1.0	157.2	5.5	151.4	1.6
$z_G(\text{mm})$	73.0	73.4	0.5	63.8	-12.6	52.8	-27.7
$IGx(\text{kg m}^2)$	0.3758	0.3819	1.6	0.3750	-0.2	0.3694	-1.7
$IGy(\text{kg m}^2)$	0.2585	0.2453	-5.1	0.2432	-5.9	0.2499	-3.3
$IGz(\text{kg m}^2)$	0.4641	0.4612	0.6	0.4784	3.1	0.4751	2.4
$\psi(^{\circ})$	0	11.0		-7.4		6.3	
$\theta(^{\circ})$	0	2.2		0.5		2.3	
$\phi(^{\circ})$	0	-3.2		8.1		14.7	

시뮬레이션 모델로부터 수학적으로 계산된 질량선 값에 대하여  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ ,  $\pm 30\%$  의 값을 랜덤하게 가감한 질량선 값을 입력한 경우에 출력되는 강체특성 값의 추정가능성을 시뮬레이션하여 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 에 나타낸다. 즉 각각의 경우에 대하여 매번 랜덤오차를 발생시키면서 10 만회 반복하여 출력되는 강체특성 값의 분포를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 5 는 질량중심점 중에  $x_G$  에 대하여 나타낸다.  $y_G, z_G$  의 경우도  $x_G$  와 비슷한 분포로 나타낸다. Fig. 6 은 관성모멘트 중에  $IGx$  를 나타내고  $IGy, IGz$  도 유사한 분포로 나타낸다. Fig. 7 은 관성적 값을 관성주축에 대한 변환행렬의 오일러 각으로 변환 했을 때 Z축에 대한 회전각  $\phi$  의 분포를 나타낸다.  $y''$ 에 대한 회전각  $\theta$ ,  $x''$ 에 대한 회전각  $\phi$ 도 비슷한 분포를 가진다. Table 1 은 위의 시뮬레이션 중에 한 경우에 해당하는 질량선 값을 입력 할 때 출력되는 강체특성 값을 Exact 값과 비교하여 나타낸 것이다.

#### 4. 실험

본 연구에서 제안한 방법으로 실제 구조물을 Fig. 1 과 같이 길고 유연한 줄에 매달아 놓고 실험하여 얻은 질량선 값으로 강체특성 값을 규명해 보았다. 우선 Fig. 4 와 같이 모양이 단순한 Box 형 강체모델에 대해서 실험하고, Fig. 8 과 같이 질량을 추가한 비대칭형 모델에 대해서 실험을 실시한다.

##### 4.1 Box 형 강체모델

Fig. 4 와 같이 단순한 Box 형 구조물에 대하여 3 점 가진의 3 점 3 방향 응답의 질량선 값을 실험적으로 구하여 수학적으로 계산된 Exact 값과 비교하여 Table 2 에 나타낸다. 여기서 '1Ax'는 점 1 가진에 대한 점 A 의 x 방향 응답의 질량선 값을 의미한다. Table 3 은 실험으로 구한 질량선 값(Table

2)을 입력으로 하여 추정된 강체특성 값을 수학적으로 계산된 Exact 와 비교하여 나타낸 것이다. 실험으로부터 얻은 질량선의 값은 Exact 값과 비교할 때  $\pm 20\%$ 정도의 차이를 가지고 있고 추정된 강체특성 값은  $\pm 10\%$  이내의 오차가 있음을 알 수 있다.

**Table 2** Mass line of simple box ( $\times 10^{-3} \text{ m/s}^2/\text{N}$ )

	Exact	실험치	오차(%)
1Ax	-14.97	-14.74	-1.5
1Ay	13.99	13.20	-5.6
1Az	-55.77	-55.10	-1.2
1Bx	33.62	31.43	-6.5
1By	-31.42	-33.04	5.1
1Bz	-39.34	-40.37	2.6
1Cx	14.97	17.85	19.2
1Cy	-13.99	-18.07	29.2
1Cz	5.66	9.52	68.2
2Ax	-15.79	-19.19	21.6
2Ay	-42.35	-39.69	-6.3
2Az	-35.91	-35.54	-1.0
2Bx	-32.40	-35.30	9.0
2By	14.74	18.74	27.2
2Bz	12.49	13.76	10.1
2Cx	30.41	27.06	-11.0
2Cy	-21.10	-17.76	-15.8
2Cz	-17.89	-19.44	8.7
3Ax	19.98	15.50	-22.4
3Ay	8.76	8.97	2.4
3Az	15.83	10.58	-33.2
3Bx	-15.19	-16.55	9.0
3By	29.34	33.18	13.1
3Bz	-12.03	-6.77	-43.7
3Cx	39.85	38.15	-4.3
3Cy	11.20	14.59	30.3
3Cz	31.58	27.51	-12.9

**Table 3** Results of experiment for simple box

	Exact	실험치	오차(%)
$x_G(\text{mm})$	111.0	118.4	6.7
$y_G(\text{mm})$	149.0	157.2	5.5
$z_G(\text{mm})$	73.0	74.1	1.6
$IGx(\text{kg m}^2)$	0.3758	0.3962	5.4
$IGy(\text{kg m}^2)$	0.2585	0.2687	4.0
$IGz(\text{kg m}^2)$	0.4641	0.4988	7.5
$\psi(^{\circ})$	0.0	-5.5	
$\theta(^{\circ})$	0.0	-5.7	
$\phi(^{\circ})$	0.0	-11.9	

##### 4.2 비대칭형 모델

Fig. 8 와 같이 Box 형 강체모델에 질량을 부가한

비대칭형 모델에 대하여 임팩트 가진으로 구한 각 점, 각 방향의 질량선 값을 수학적으로 계산된 Exact 와 비교하여 Table 4 에 나타낸다. Table 5 은 Table 4 의 질량선 값을 이용하여 추정한 강체특성 값을 나타낸 것이다. 대칭형 Box 형 구조물의 일 부분에 질량이 부가 됨에 따라 비대칭형 구조물이 되면서 질량중심과 관성모멘트 그리고 관성주축이 바뀌는 것을 상당히 잘 추정하고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결론

강체모드와 탄성모드가 없는 일정한 값을 가지는 주파수 응답함수의 질량선을 이용하여 강체특성 값을 구하는 프로그램을 개발하였다. 어느 정도 오차를 가지는 질량선 값이 입력 되었을 때 강체특성 값에 생기는 오차의 정도를 시뮬레이션으로 조사하였다. 강체구조물이 자유롭게 거동할 수 있는 자유경계조건을 만들기 위해 길고 유연한 줄을 이용하여 구조물을 매달았다. 이렇게 설치된 구조물에 임팩트 가진하여 얻은 가속도응답의 일정한 질량선 값을 이용하여 그 구조물의 강체특성을 추정하였다.

본 연구에서 제안하는 강체특성 규명법으로 구조물을 쉽게 설치하고 간단한 임팩트 실험으로 높은 정도의 추정결과를 얻을 수 있었다. 또한 가진 점과 응답점의 수를 더 늘린다면 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- (1) Willem Leurs, Ludo Gielen, Marc Mrughmans and Benoit Dierckx : Calculation of rigid body properties from FRF data, practical implementation and test cases, LMS international NV, Interleuvenlaan 68, 3001 Leuven, Belgium.
- (2) 류석주, 1995, "마운트 지지 구조물의 강체특성의 실험적 규명에 관한 연구,공학석사 학위논문", 부산대학교.

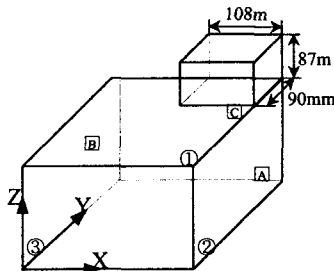


Fig. 8. Asymmetric model with add mass (6kg)

Table 4 Mass line of simple box ( $\times 10^{-3} \text{ m/s}^2/\text{N}$ )

	Exact	실험치	오차(%)
1Ax	-21.36	-19.53	-8.6
1Ay	26.13	25.72	-1.6
1Az	-43.50	-40.88	-6.0
1Bx	24.20	27.96	15.6
1By	-24.51	-27.43	11.9
1Bz	-38.58	-39.49	2.4
1Cx	-3.40	-4.36	28.4
1Cy	-2.58	-1.33	-48.4
1Cz	7.57	7.74	2.3
2Ax	-19.73	-22.65	14.8
2Ay	-35.21	-31.06	-11.8
2Az	-25.90	-25.07	-3.2
2Bx	-38.24	-42.97	12.4
2By	16.04	18.95	18.2
2Bz	11.95	10.88	-9.0
2Cx	18.78	15.74	-16.2
2Cy	-15.95	-13.94	-12.6
2Cz	-12.71	-12.60	-0.9
3Ax	15.61	13.02	-16.6
3Ay	10.59	11.47	8.3
3Az	13.89	13.43	3.3
3Bx	-18.56	-22.36	20.5
3By	29.56	32.91	11.3
3Bz	-14.51	-12.30	-15.2
3Cx	31.84	29.37	-7.8
3Cy	13.08	15.55	18.8
3Cz	26.14	25.05	-4.2

Table 5 Results of experiment for asymmetric model

	Exact	실험치	오차
$x_c(\text{mm})$	120.5	129.9	7.8
$y_c(\text{mm})$	166.3	176.5	6.1
$z_c(\text{mm})$	92.4	89.6	-3.0
$IG_x(\text{kg m}^2)$	0.5055	0.5526	9.3
$IG_y(\text{kg m}^2)$	0.3522	0.3514	-0.2
$IG_z(\text{kg m}^2)$	0.5443	0.5668	4.1
$\psi(^{\circ})$	-29.8	-36.3	
$\theta(^{\circ})$	14.9	16.9	
$\phi(^{\circ})$	-6.8	-5.6	