

## 선내 탑재 마운팅 장비의 동특성에 관한 실험적 연구

김극수<sup>†\*</sup>, 최수현<sup>\*</sup>

대우조선공업(주) 진동/소음연구팀<sup>\*</sup>

An Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Onboard Machinery with Resilient Mounts

Kuk-Su Kim<sup>†\*</sup> and Su-Hyun Choi<sup>\*</sup>

Noise and Vibration R & D Team, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., LTD.<sup>\*</sup>

### Abstract

This study is performed to evaluate and design the dynamic characteristics of the onboard machinery with resilient mounts. To avoid resonance with onboard machinery and external force, it is necessary to calculate natural frequencies of the resilient mounting system more accurately. Natural frequencies of on board machinery are determined by rigid body properties(mass, moment of inertia, center of mass) of machinery and stiffness of mounts. But it is very difficult to calculate rigid body properties theoretically. And stiffness properties of rubber mounts vary with dynamic displacement, pre load, frequency and temperature, and so on.

In this study, we have identified rigid body properties using experimental modal analysis and estimated dynamic stiffness of rubber mount for onboard machinery using measured vibration response during seatrial. We measured displacement excitation through deck under mounts and evaluated relationship between modes of resilient mounting system and main excitation sources of a ship.

※ Keywords : Vibration(진동), Resilient Mount(탄성마운트), System Identification(시스템 규명)

### 1. 서론

선박에 탑재되는 마운팅 장비와 선내 주요 기

진원과의 공진을 회피하기 위해선, 마운팅 장비의 고유진동수를 정도 높게 추정할 필요가 있다. 이러한 마운팅 장비의 고유진동수는 마운트의 강성과 장비의 강체특성에 의해서 결정되어진다. 그러나 장비의 강체특성은 장비의 복잡한 기하학적 형상으로 인해 이론적 계산이나 모델링이 어렵기 때문에 실험으로 강체특성을 측정할 필요가 있으

접수일: 2002년 12월 16일, 승인일: 2003년 1월 7일

†주저자, E-mail : hunting@dsme.co.kr

Tel : 055-680-5549

며, 마운팅 장비의 정도 높은 고유진동수 예측을 위해서는 마운트의 강성특성이 사용환경(주파수, 초기하중, 동적변형량, 온도 등)에 좌우됨을 고려해야 한다. 또한 선박의 주요 기진력성분이 운항 속도의 변화에 따라 넓은 주파수 범위에 분포하고 있으므로, 마운팅 장비의 고유모드를 모든 기진력 성분으로부터 공진회피 하기란 어렵다. 따라서 마운팅 장비의 실질적인 공진회피를 위해선 마운트 하부 갑판에 지배적으로 전달되는 기진력성분과 장비의 주요모드사이의 연성관계를 파악하여, 비록 기진력의 주파수와 장비의 고유진동수가 일치하더라도 장비의 고유모드를 가진하지 못하는 기진력 성분은 제외하고, 모드를 가진하는 기진력 성분을 중심으로 공진회피 여부를 판단해야 한다.

본 연구에서는 마운팅 장비의 고유진동수를 정도 높게 예측하기 위하여 실선에 장착된 장비의 강체특성은 실험적 모드해석을 통하여 추정하고, 마운트의 강성은 실선 운항중 계측한 응답을 이용하여 추정하는 방법을 적용하였다. 또한 실질적인 공진회피설계를 위해 선내 주요 기진력성분과 마운팅 장비의 고유모드 사이 연성관계를 파악하였다

## 2. 마운팅 장비의 동역학적 모델링

### 2.1 실험모드해석을 이용한 강체특성추정

마운팅 장비의 강체특성을 추정하는 방법은 다음과 같다. 실험모드해석을 통하여 추정할 마운트 시스템의 강체특성은 무게(m), 질량중심의 좌표(  $x_G, y_G, z_G$  ), 질량중심에서 관성모멘트(  $I_{xx}^G, I_{yy}^G, I_{zz}^G, I_{xy}^G, I_{yz}^G, I_{zx}^G$  )이다.

가상중심점 d에서의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_d \ddot{\bar{x}}_d + K_d \bar{x}_d = f_d \quad (1)$$

여기서

$\bar{x}_d = (x, y, x, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$  : 병진 및 회전운동 변위

$M_d = T_{Gd}^T M T_{Gd}$  : 가상중심에서 질량행렬

$M$  : 질량중심에서의 질량행렬

$T_{Gd}$  : 가상중심과 질량중심 사이의 응답 변환행렬

$$T_{Gd} = \begin{bmatrix} [I] & [U_{Gd}] \\ [0] & [I] \end{bmatrix} \quad (2)$$

단

$$U_{Gd} = \begin{bmatrix} 0 & (z_G - z_d) & -(y_G - y_d) \\ -(z_G - z_d) & 0 & (x_G - x_d) \\ (y_G - y_d) & -(x_G - x_d) & 0 \end{bmatrix}$$

$U_{Gd}$  : 무게중심에서 회전운동에 의한 가상중심에서의 병진변환행렬

여기서

$(x_G, y_G, z_G)$  : 질량 중심의 좌표

$(x_d, y_d, z_d)$  : 가상 중심의 좌표

각 지점의 i에 있는 마운트의 강성을 장비의 가상중심에서의 강성으로 변환하면

$$K_d = \sum_{i=1}^n T_{id}^T K_i T_{id} \quad (3)$$

여기서

$$T_{id} = \begin{bmatrix} [I] & [U_{id}] \end{bmatrix}$$

가상중심점에서 구해진 질량 행렬과 강성행렬을 운동방정식에 대입하고, 조화 기진력  $f_d = F e^{i\omega t}$  이 작용할 때 응답은 고유모드의 선형 합으로 ( $\bar{x}_d = \Phi q e^{i\omega t}$ ) 나타낼 수 있으므로 힘을 0으로 가정하면 다음의 고유치 문제를 얻는다.

$$[-\omega_n^2 [M_d] + [K_d]] [\Phi] = \{0\} \quad (4)$$

모드 실험(Modal test)으로부터 고유진동수 ( $\omega_{nr}$ )와 고유모드  $\{\phi_r\}$  를 구하면 위식은 다음식으로 바꿀수 있다.

$$[-\omega_{nr}^2 [M_d] + [K_d]] [\phi_r] = \{0\} \quad (5)$$

$(r = 1, 2, \dots, e)$

e: 실험으로 구한 모드의 개수

위식으로부터 구해야 할 미지수는 장비의 질량 (m)을 알고 장비가 동일한 원통형 마운트에 의해 지지되어 있다고 가정할 때 질량중심의 좌표 (  $x_G, y_G, z_G$  ), 질량중심에서 관성모멘트 (  $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}$  ), 마운트의 반경방향 및 축방향 강성 (  $k_r, k_a$  ) 총 11 개의 미지수이다. 모드실험으로 구한 여섯쌍의 모드매개변수를 이용하면 36 개의 연립방정식을 얻을 수 있으므로, 미지수의 항보다 연립방정식이 많으므로, 최소오차자승법을 이용하여 미지수를 구할 수 있다. 미지수의 항으로 연립방정식을 정리하면 다음의 행렬식을 얻는다.

$$[A]\{u\} = \{b\} \tag{6}$$

따라서 미지수는 다음과 같이 최소오차 좌승법을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{u\} &= [A]^+ \{b\} \\ &= [[A]^T [A]]^{-1} [A]^T \{b\} \end{aligned} \tag{7}$$

위식으로부터 장비의 강체특성과 마운트의 강성을 구할 수 있으나, 앞서 설명한 바와 같이 마운트의 강성은 마운트의 사용환경(주파수, 동진폭, 초기하중, 온도 등)에 따라 달라지므로 실제 선박의 시운전시 예측한 응답을 이용하여 다시 계산하여야 한다.

### 2.2 마운트 강성 추정

장비의 무게중심에서 운동방정식은 다음과 같다.

$$M \ddot{x} + Kx = f \tag{8}$$

여기서  $x = (x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$

선내 탑재 마운팅 장비의 마운트가 Fig.1 과 같이 장비의 하부에 수직으로 부착되어있는 Bottom arrange 형 마운트이고 전역 좌표계의 관성주축이 지역좌표계의 관성주축과 일치하는 경우 운동방정식은 다음과 같이 간단하게 정리된다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + K_{11}x + K_{15}\theta_y &= 0 \\ m\ddot{y} + K_{22}y + K_{24}\theta_x &= 0 \\ m\ddot{z} + K_{33}z &= 0 \\ I_{xx}\ddot{\theta}_x + K_{42}y + K_{44}\theta_x &= 0 \\ I_{yy}\ddot{\theta}_y + K_{51}x + K_{55}\theta_y &= 0 \\ I_{zz}\ddot{\theta}_z + K_{66}\theta_z &= 0 \end{aligned} \tag{9}$$

위 식에서 나타나듯이 선내 탑재 마운팅 장비의  $x - \theta_y, y - \theta_x$  자유도가 각각 연성되어 있으며  $z$  와  $\theta_z$  자유도는 비연성이다.

식 (9)의 경우에 마운트의 강성을 추정하기 위한 고유진동수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \omega_{1,5}^2 &= \frac{1}{2ml_{yy}} \{I_{yy}K_{11} + mK_{55} \pm \sqrt{(I_{yy}K_{11} - mK_{55})^2 + 4ml_{yy}K_{15}^2}\} \\ \omega_{2,4}^2 &= \frac{1}{2ml_{xx}} \{I_{xx}K_{22} + mK_{44} \mp \sqrt{(I_{xx}K_{22} - mK_{44})^2 + 4ml_{xx}K_{24}^2}\} \\ \omega_3^2 &= \frac{K_{33}}{m} \\ \omega_6^2 &= \frac{K_{66}}{I_{zz}} \end{aligned} \tag{10}$$

원형마운트를 사용할 경우, 미지수는 마운트의 반경방향 강성 (  $k_1 = k_2$  ) 과 수직방향의 강성 (  $k_3$  ) 이므로, 만약  $z$  방향의 고유진동수  $\omega_3$  과  $x - \theta_y$  방향의 고유진동수  $\omega_{15}$  즉  $\omega_1$  이나  $\omega_5$  두개의 고유진동수중 하나가 예측된다면 위식을 정리하여 마운트의 강성을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} k_3 &= \frac{m}{n} \omega_3^2 \\ k_1 &= \frac{ml_{yy}\omega_{1,5}^4 - m \sum_{i=1}^n a_i^2 k_3 \omega_{1,5}^2}{nl_{yy}\omega_{1,5}^2 + mnc^2\omega_{1,5}^2 - n \sum_{i=1}^n a_i^2 k_3} \end{aligned} \tag{11}$$

### 3. 마운팅 장비 동적특성 추정 실험

실선에 탑재되는 발전기(Diesel generator)의 강체특성을 계산하기 위해서, 먼저 장비의 모드 실험(Modal test)를 실시하였다. 발전기의 가진 위치 및 응답 예측 위치는 Fig.1 와 같이 마운트 3 의 위치에서 수직 방향으로 가진을 하고, 6 개의

위치에서 3 방향으로 가속도 응답을 계측하였다. 계측된 힘과 가속도를 이용하여 Fig.2 와 같이 주파수 응답함수를 구하고 이를 모드해석 프로그램인 STAR 로 넘겨, 모드 매개 변수(Modal parameter)를 구한 후 계측한 병진고유모드를 가상중심점의 병진 및 회전 모드로 변환하고, 최대값으로 정규화하여 Table.1 에 정리하였다. 가상중심점에서의 모드 매개 변수를 식 (6)에 대입하여 장비의 관성모멘트, 마운트 강성 및 무게중심의 위치를 추정하면 Table.2 와 같다. 추정된 값에 의해 결정되는 장비의 무게중심에서의 질량행렬과 강성행렬을 구하고, 이 수학적 모델을 이용하여 구한 고유진동수와 모드실험으로 구한 고유진동수는 Table.3 과 같다. 이 수학적 모델을 이용하여 구한 고유진동수는 실험으로 구한 고유진동수와 5 % 이내에서 잘 일치하고 있다

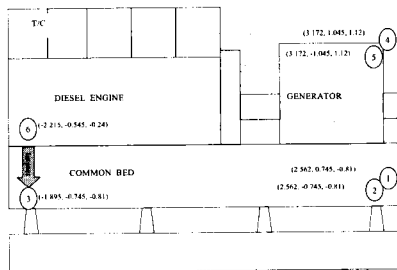


Fig. 1 Experimental setup of impact test

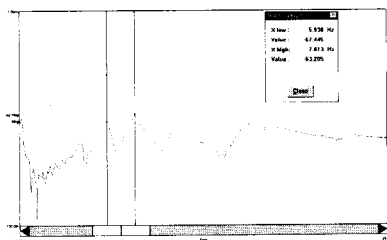


Fig. 2 Accelerance  
(Excitation point: 3z, Response point:6z)

Table 1 Modal parameters of diesel generator at virtual center of gravity

Mode	1st	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	6 <sup>th</sup>
X	-0.07	1	-0.06	-0.48	1	-0.03
Y	1	0.005	0.03	0.69	-0.04	0.70
Z	0.07	0.039	1	0.05	0.08	-0.16
$\theta_x$	-0.66	-0.02	-0.01	-0.25	-0.03	1
$\theta_y$	0.01	0.511	0.02	0.02	-0.5	-0.05
$\theta_z$	-0.02	0.008	-0.00	1	0.05	-0.12
Natural freq. (Hz)	4.2	5.96	7.8	8.25	10.5	15.5

Table 2 Structural parameters of diesel generator by experimental modal analysis

Parameter	Unit	Value
$I_{xx}$	kg m <sup>2</sup>	22071
$I_{yy}$	kg m <sup>2</sup>	118469
$I_{zz}$	kg m <sup>2</sup>	116452
$I_{xy}$	kg m <sup>2</sup>	-6594
$I_{yz}$	kg m <sup>2</sup>	-9182
$I_{zx}$	kg m <sup>2</sup>	-16529
$K_x, K_y$	N /m	1.06E+07
$K_z$	N /m	1.13E+07
$X_G$	M	-0.17
$Y_G$	M	0.079
$Z_G$	M	0.278

Table 3 Comparison of natural frequencies between modal test and mathematical model (Unit : Hz)

Mode	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	6 <sup>th</sup>
Modal test	4.16	5.96	7.80	8.25	10.54	15.5
Mathematical model	4.08	5.82	8.16	8.37	10.62	15.6
Error	2%	2%	5%	2%	1%	1%

(Note)  $error = \frac{|modal\ test - mathematical\ model|}{modal\ test} \times 100\%$

#### 4. 마운트 동특성 추정 실험

마운트의 강성을 추정하기 위해 시운전시 주기

관의 회전수를 78rpm 에서 55rpm 까지 천천히 줄이면서 발전기(이하 장비)의 응답을 계속하였다. 계측위치는 Fig.3 과 같이 장비의 마운트 상하부에서 12 점을 선정하였으며, 7 번 마운트 상부에서 수직방향의 가속도응답을 Fig.4 에 나타내었다. 마운트 하부에 5 개의 가속도계는 주요기진력 성분이 각 방향별 변위 기진력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 7 번에 x,y,z 방향별로 3 개를 부착하였고, 장비가 설치된 부분에서 변위기진력 입력의 변화는 x 와 y 방향보다는 z 방향의 변화가 크므로 다른 마운트의 하부에서 z 방향으로 계측을 하였다. 또한 상부 7 개의 가속도계는 장비의 Operational deflection shape(이하 ODS)를 계측하기 위하여 부착하였으며, 7 번 마운트 상부에 있는 x,y,z 방향별 3 개의 가속도계는 변위기진력에 대한 장비의 방향별 응답과 주요 기진력 성분을 분석하기 위한 것이며, 나머지 3 개의 수직방향 가속도계는 수직방향 및 Pitching 모드를 분석하기 위한 것이며, 1 나의 횡방향 가속도계는 횡방향 및 Yawing 모드를 분석하기 위하여 선정하였다.

과도진동이 발생한 주파수에서 Operational deflection shape 을 분석하면 7.36Hz 는 수직방향 모드이며 10.28Hz 는 Pitching 모드로 판단되어진다. 이렇게 계측한 고유진동수를 식 (9)에 대입하고 마운트의 강성을 구하면, 마운트의 반경방향의 강성은 10.87E6 N/m 이고 수직방향의 강성은 8.686E6 N/m 로 평가 되어진다. 실험으로 구한 장비의 강체특성과 마운트의 강성을 이용하여 수학적 모델을 구성하고, 이렇게 구한 수학적 모델의 고유진동수를 시운전에서 계측한 값과 비교하면 Table.4 와 같다

5. 장비 모드와 기진력의 연관관계

주요 모드와 기진원 성분과의 상관관계를 분석하면, 수직방향의 주요모드는 수직과 Pitching 모드이며 주요 기진원은 주기관과 추진기 성분으로 판단된다. 종방향의 주요모드는 Pitching 모드이며 추진기 기진성분과 연관되어 있고, 횡방향의 주요모드는 Yawing 과 Rolling 모드이며 주기관과 연관되어 있는 것으로 판단된다.

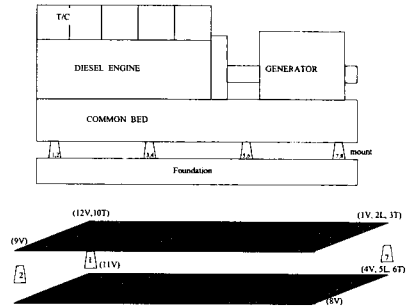


Fig. 3 Measurement location of diesel generator on sea trial

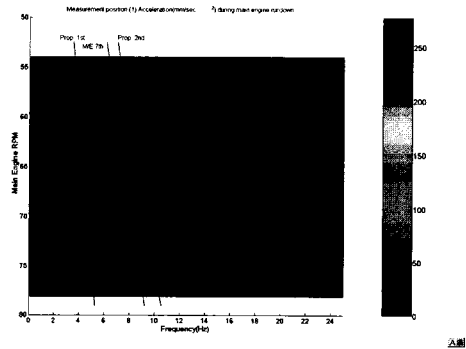


Fig. 4 Vertical acceleration level on mount of diesel generator at position 1 on sea trial

Table 4 Natural frequencies by mathematical model and measurement during main engine run down (Unit: Hz)

Mode	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	6 <sup>th</sup>
Measurement			7.36	8.2	10.28	
Math. model	3.75	5.32	7.36	8.18	10.28	14.72

6. 결론

본 연구를 통하여, 마운팅 장비의 고유진동수 정도 높게 예측하기 위하여 실선에 장착된 장비의 강체특성은 실험적 모드해석을 통하여 추정하고, 마운트의 강성은 실선 운항중 계측한 응답을 이용

하여 추정하는 방법을 적용하였다. 또한 실질적인 공진회피설계를 위해 선내 주요 기진력성분과 마운팅 장비의 고유모드 사이 연성관계를 파악하였다.

향후, 본 연구를 통하여 얻어진 마운트 하부 변위기진력을 참고로, 마운트의 사용환경을(주파수, 초기하중, 동적변형량, 온도) 분류하고, 사용환경에 따른 실제 마운트의 강성이 변형량을 추정하는 연구가 수행될 예정이며, 이는 장비가 실제로 선박에 탑재된 상태에서 마운트 시스템의 성능평가 및 공진회피 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 최수현, 김극수, 2002, “ 선내 탑재 장비용 마운팅 시스템의 진동특성 평가에 관한 연구” , 대한조선학회논문집, 2002, V. 29, N. 1, pp. 73-81
- 조연, 김병근, 2001, “ 선내 탑재 장비용 방진 마운팅 시스템 개발” , 고등기술연구원 보고서
- 정의봉, 1995, “ 마운트지지 구조물의 강제특성의 실험적 규명법 개발” , 대한정밀공학회추계 학술대회, pp. 591-595

- 박윤식, 1986, “ 모우드 측정을 이용한 관성 모멘트 도출” , 한국자동제어학술회의논문집, V. 1, pp. 102-107
- 이영민, 전호환, 김희정, 2001, “ 선형최적화 기들에 대한 비교연구” , 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 244-248
- 정경렬, 1988, “ 실험적 모우드 해석을 통한 엔진 마운트계의 동역학적 모델링” , 자동차공학회지, V. 10, No. 2, pp. 298-302
- 이윤복, 1994, “ 강제 관성특성 규명을 위한 응답점 및 가진점 선정에 관한 연구” , 한국과학기술원



< 김 극 수 >



< 최 수 현 >