

# 선내 탑재 장비용 마운팅 시스템의 진동특성 평가 프로그램 개발

°김극수\*, 최수현\*, 백일국\*, 조연\*\*, 김병곤\*\*

## Development of evaluation program for vibration characteristics of onboard machinery with resilient mountings

°Kuk-Su Kim, Su-Hyun Choi, Il-Cuk Baek, Yeon cho, Byoung-Gon Kim

### ABSTRACT

This study is performed to evaluate and design the vibration characteristics of the onboard machinery with resilient mountings. To reduce the vibration level of onboard machinery with resilient mountings, it is important to evaluate and, if necessary, modify the vibration characteristics of the resilient mountings. In this study, we have developed a program to calculate natural frequencies of the machinery with resilient mountings, forced vibration levels due to internal excitation force of the machinery itself and external excitation forces of the main engine and the propeller, and the force and motion transmissibility of the resilient mountings. The developed program is also able to be applied to optimal design of the resilient mountings for obtaining a target natural frequency and for achieving a minimum forced vibration level at the center of gravity of the machinery.

### 1. 서론

최근 선박의 운항속도 증가와 주기관의 기진력 증가 추세에 따라 선박의 진동 및 소음 문제의 발생 가능성이 점점 높아지고 있으며 안락한 선상 생활에 대한 선주의 요구가 과거에 비해 매우 엄격해짐에 따라 선박의 진동 및 소음 허용치가 더욱 낮아지는 추세에 있다. 특히 선박에 탑재되는 주요 장비의 진동은 장비 기능의 원활한 수행과 수명 연장이라는 관점에서 중요한 관심사로 대두되고 있는 실정이다. 선박에 탑재되는 주요 장비 중 비교적 기진력이 크게 발생되고 방진마운트를 장착한 장비(Diesel Generator, Air Compressor 등)

는 부적절한 방진마운트 선정으로 인하여 시운전 시 자주 진동문제가 발생하고 있다.

그런데, 장비 자체 기진력에 의한 방진 마운트 장착 장비의 진동특성 예측은 장비 제조업체의 기술력에 의해 어느정도 성능 평가가 이루어지고 있고 Shop test에서 진동수준을 확인할수 있다.

그러나, 선내 주요 기진원인 Main Engine 및 Propeller와 같은, 장비 외부로부터 가해지는 기진력에 의해 방진 마운트 장착 장비의 진동특성을 평가하는 것은 아직 미흡한 상태이며 시운전에서 확인할수 밖에 없는 실정이다.

선박에 주된 기진원으로 작용하는 Main Engine 및 Propeller의 기진 진동수는 넓은 주파수 범위에 걸쳐 분포하기 때문에 이 모든 가진 주파수와 공

\* 대우중공업 선박해양기술연구소 진동소음연구팀

\*\* 고등기술연구원 제품시스템연구실 소음진동팀

진을 회피할 수 있는 방진 마운트 시스템을 설계한다는 것은 불가능에 가까운 일이다.

그러므로, 방진 마운트 시스템의 진동 특성의 평가 및 설계변경을 위해서는 외부 기진력의 주파수 뿐 아니라 그 방향과 크기를 동시에 고려해야 하며 장비 하부구조의 진동특성도 중요하게 다루어져야 할 것이다.

따라서, 시운전시 외부 기진력에 의한 장비 마운트 하부 구조의 응답을 측정하여 하부구조의 진동 특성을 추출하고, 이 진동특성에 의한 마운트 시스템의 응답을 계산하여 마운트 시스템의 성능을 평가하는 것도 중요하다.

그러나, 선박내 방진 마운트를 장착한 장비의 경우, 문제 발생시 정확한 원인 파악이 어렵고 해결 방법을 장비 제조업체에 전적으로 의존하게 되므로 신속한 대처가 이루어지지 않고 있다. 따라서 시급한 진동 문제에 대한 자체해결 능력이 필요한바, 방진 마운트 장착 장비의 진동특성 파악 및 설계변경에 대한 연구의 필요성이 대두되었다.

본 연구에서는, 방진 마운트를 장착한 장비의 전체시스템에 대한 고유진동해석, 전달율계산, 강제진동해석 등을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 선내 주요 기진원과의 공진시 공진회피를 위한 마운트 설계 변경 프로그램을 개발 하였으며 실제 선박에 적용한 결과를 비교 검토하였다. 그리고 Genetic Algorithm(GA)을 이용하여 마운트 하부의 변위가진에 의한 장비의 속도응답이 최소가 되도록 마운트 강성을 결정하는 최적화 프로그램을 개발 하였다.

## 2. 프로그램의 구성

본 선박 장비 마운트 프로그램은 Fig.1과 같이 마운트 평가 프로그램과 설계 변경 프로그램으로 구성되어 있다. 마운트 평가 프로그램은 마운트 시스템의 진동특성을 평가하는 데 사용하며, 고유진동해석, 전달율 계산, 강제진동해석 모듈로 나누어져 있다. 마운트 설계 변경 프로그램은 마운트 시스템의 문제가 되는 고유진동수를 Target 고유진동수로 변경하고자 할 경우, 마운트의 강성 및 위치를 찾아 주는 프로그램이다.

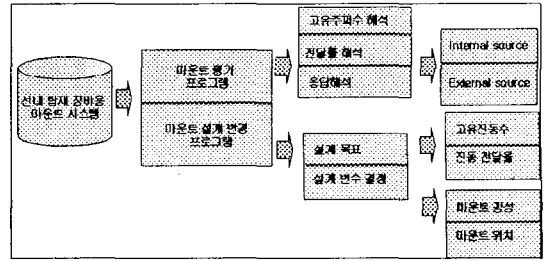


Fig.1 Structure of Developed Mount Program

## 3. 마운트 평가 프로그램

마운트 평가 프로그램은 Fig.2와 같이 마운트 시스템의 정보를 읽는 모듈, 각 고유진동수에 따른 모드 형상을 보여주는 모듈, 마운트 시스템의 전달율을 계산해 주는 모듈, 장비의 내부 및 외부 기진력에 의한 진동응답을 계산해 주는 모듈, 마운트 하부 변위가진에 의한 시스템의 응답을 계산해 주는 모듈 및 계산 결과를 보고서 형태로 출력하는 모듈로 구성되어 있다.

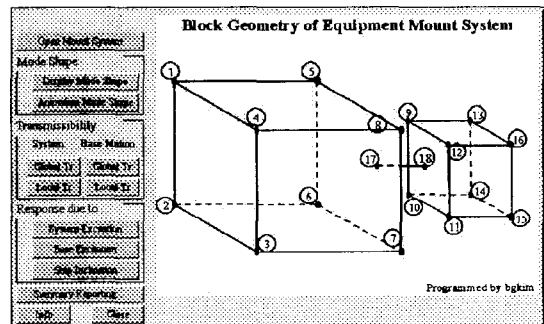


Fig.2 Main Window for mount program

### 3.1 마운트 고유진동 해석 모듈

마운트의 고유진동해석 모듈은 Fig.3과 같이 각 고유진동수에 따른 모드를 볼 수 있다.

View Control을 이용하여 임의의 각도에서의 모드 형상을 볼 수 있다. 또한 마운트 시스템의 모드형상이 모호한 경우 모드 형상을 animation 하여 볼 수 있다. 본 모듈을 이용한 선내 탑재 장비의 고유진동 해석 결과를 Maker의 고유진동 해석결과와 비교하여 Table 1에 정리 하였다.

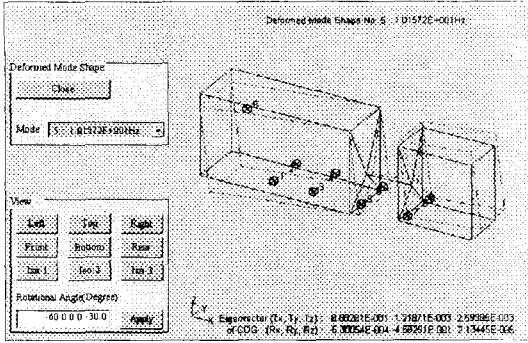


Fig.3 Free Vibration Analyses

Table 1 Calculated Natural Frequencies of Mount System

Mode	X	Y	Z	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
당사	10.2	5.3	8.3	15.4	6.8	9.1
Maker	10.2	5.3	8.3	15.4	6.8	9.1

### 3.2 마운트 시스템의 전달율 계산

힘 전달율은 마운트 시스템에 입력되는 힘과 마운트를 통하여 지지부로 전달되는 힘의 비를 전달율로 정의되며, 당사 건조 선박에 탑재되는 장비의 힘 전달율을 Fig.4에 나타내었다. 장비를 강제모 가정하여 모델링하였기 때문에, 전달율은 6개의 입력과 6개의 출력을 가지므로 모두 36개의 전달율 그래프가 그려진다.

변위전달율은 장비의 마운트를 통하여 입력되는 변위와 이로 인하여 발생하는 장비의 변위로 정의되며, Fig.5와 같이 나타내어진다.

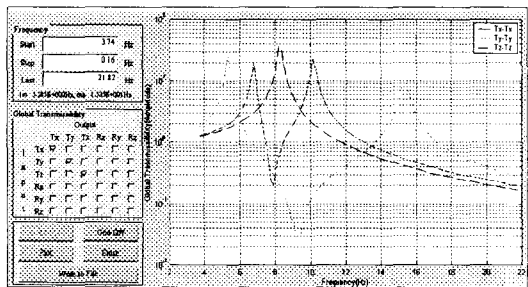


Fig.4 Force Transmissibility of Mount System

### 3.3 마운트 시스템의 강제진동 응답 계산

선내 장비의 진동은 기진력이 장비자체에서 발생하는 내부기진력과 Main Engine과 Propeller에 의하여 발생하는 외부 기진력으로 나누어 생각할 수있다. 내부 기진력에 대한 강제진동 응답은 무게중심에서 발생하는 힘을 입력하여 Fig.6과 같이 계산된다.

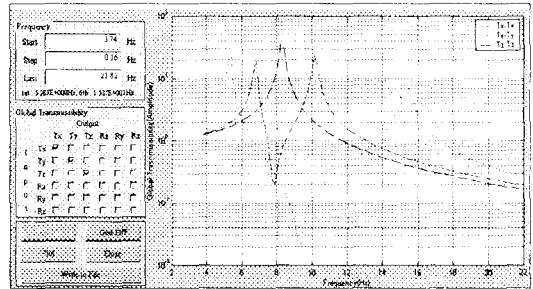


Fig.5 Motion Transmissibility of Mount System

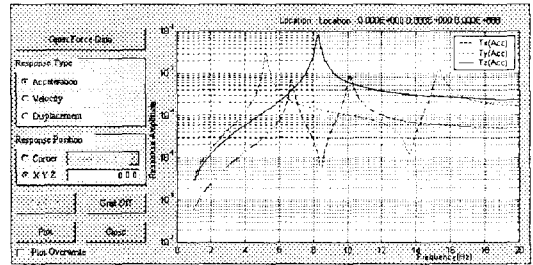


Fig.6 Vibration Response of Mount System due to Internal Force

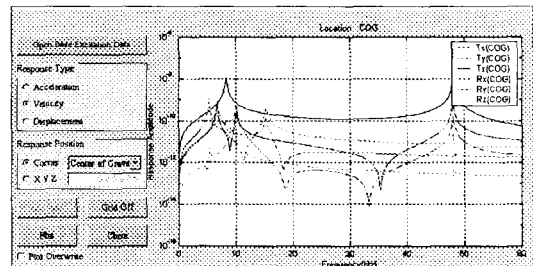


Fig.7 Vibration Response of Mount System due to External Base motion

외부기진력인 지지부 변위 가진에 의한 응답은 각 마운트 하부에서 계측된 가속도를 입력 하면 장비에서의 가속도 응답이 Fig.7과 같이 계산된다.

Table 2 Calculated Mount Stiffness

	Kx	Ky	Kz
Stiffness (N/m)	0.645E7	0.645E7	0.575E7

#### 4. 마운트 설계 프로그램

외부 기진력에의해 장비에서 과도진동이 발생할 경우, 과도진동이 발생하는 마운트의 고유진동수를 알고 있기 때문에 고유진동수를 변경하는 것이 편리하다. 즉, 문제의 고유진동수를 선내 주요 기진원과 공진 회피가 되는 고유진동수로 옮기면 된다. 이 주파수를 Target주파수로 하여 마운트의 강성과 위치를 결정할 수 있다. 마운트 설계변경 프로그램은 Fig.8과 같이 마운트 시스템의 질량, 질량관성 모멘트, 무게중심의 위치, Target 고유진동수 등을 입력하는 Pre-processor와 설계변수인 마운트의 강성값을 찾아내어 결과를 출력하는 Post-processor로 되어 있다. Target 고유진동수를 Vertical mode를 8.26 Hz, Pitch mode 10.16Hz로 하였을 경우, 마운트의 강성값이 Table 2와 같이 계산된다.

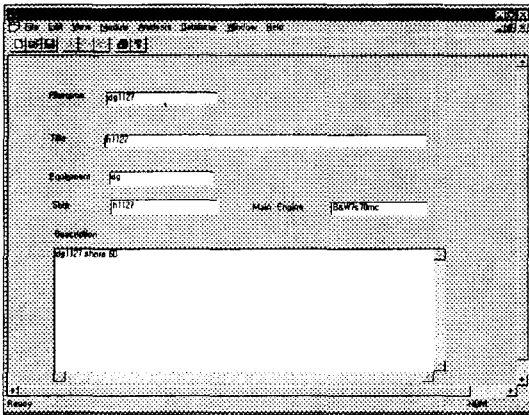


Fig.8 Modification Program of Mount Design

#### 5. 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms)을 이용한 마운트 최적설계

선박에 탑재되는 장비는 육상의 장비와는 달리 선박의 주기관과 Propeller에 의해 동시에 가진되므로, 이러한 외부 기진원에 의한 장비자체의 진동 또한 함께 고려되어야 한다. 장비 외부 기진력인 선내 주요 기진원에 의한 장비의 진동은, 장비의 고유진동 해석을 통하여 선내 주 기진원과 공진회피 관점에서 평가하고 있다. 하지만 선박의 경우, 넓은 주파수 범위에 걸쳐 가진 주파수가 분포하기 때문에 이 모든 가진 주파수와 공진을 회피할 수 있는 마운트를 설계한다는 것은 불가능에 가까운 일이다.

따라서 시운전시 장비 마운트 하부의 응답을 측정하고, 측정된 변위가진을 입력하여 마운트 시스템에서의 속도 응답값이 최소가 되도록 마운트 강성을 결정하는 최적화 프로그램을 유전자 알고리즘을 이용하여 개발 하였다.

##### 5.1 유전자 알고리즘

유전자알고리즘은 자연진화의 원리(Crossover, Mutation)를 기반으로 컴퓨터 상에 구현한 문제해결 방법이다. 개체집단(population)에서 개체들은 스트링 또는 염색체이고, 각 개체가 문제의 해가 될 가능성을 적합도(fitness)에 의해서 평가하며, 적합도가 높은 것은 다음 세대로의 진화의 과정에서 선택될 확률이 높게 된다. 기존의 다른 탐색방법들은 탐색공간에서 최적값을 찾을 때 국소해(local minimum)에 빠질 위험이 있지만 유전자알고리즘은 해가 될 가능성이 있는 해집단이 동시에 최적값을 찾아나가기 때문에 지역 국소해에 빠질 위험을 어느 정도 해결할 수 있다. 해는 적합도(fitness)로 평가되며, 이로부터 더 적합한 개체들을 선택함으로써 다음 세대의 개체집단이 구성된다. 이 새로

운 개체집단중 일부개체들은 교배와 돌연변이에 의해 새로운 해를 구성하고 이 해들의 적합도를 평가함으로써 새로운 해를 얻게 된다.

## 5.2 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계 이론적 배경

마운트 시스템의 운동방정식은 장비를 강체로 가정하여 무게중심에서 6자유도계의 강체운동을 하는 것으로 가정하였다. 시운전시 계측된 각 마운트에서의 가속도를 입력으로하여 Object function 인 장비의 속도응답을 최소화하는 마운트의 강성값을 찾아내도록한다. 이 Object function이 유전자 알고리즘의 개체 적합도 평가에 사용된다.

### Equation of Motion and Displacement

$$M \ddot{x} + [1 + j\eta]Kx = [1 + j\eta]Kq$$

$$X_w = [-w^2M + [1 + j\eta]K]^{-1} \sum_{i=1}^n (T_i^T [1 + j\eta]K T_i) Q_{i,w}$$

### Object function,

$$\Psi = \sqrt{\frac{1}{n_c} (W_x \sum_{i=1}^{n_c} X_i^2 + W_y \sum_{i=1}^{n_c} Y_i^2 + W_z \sum_{i=1}^{n_c} Z_i^2 + W_{\omega_x} \sum_{i=1}^{n_c} \Theta_{x_i}^2 + W_{\omega_y} \sum_{i=1}^{n_c} \Theta_{y_i}^2 + W_{\omega_z} \sum_{i=1}^{n_c} \Theta_{z_i}^2)}$$

여기서,

W : 각 방향에 대한 가중치  
Xw : 고유진동수에 따른 변위

### Constraints,

$$k_i^{\min} < k_i < k_i^{\max} \quad (i = 1, 2)$$

K : Dynamic stiffness

Find  $K_1, K_2$

## 5.3 유전자 알고리즘을 이용한 마운트 최적 설계 적용

실선에 탑재된 장비에서 Fig.9와 같이 Vertical 방향으로 약 20mm/sec의 과도진동이 발생하였다. 마운트 시스템의 관성제원은 Table 3과 같다. 마운트 하부에서 장비로 입력되는 방향별 속도는 Fig.10과 같다.

유전자 알고리즘을 이용하여 30개의 개체집단 (population)에 대하여 1000 세대의 진화를 거친후 최적화된 강성을 사용한 결과 장비의 속도응답은 Fig.11과 같이 속도의 최고값이 3mm/sec로 줄어 들었고 마운트의 강성값은 Table 4와 같이 변경되었다.

Table 3 장비 관성 제원 (Kg, Kgm<sup>2</sup>)

Mass	Ixx	Iyy	Izz
25489	8397.	79767.0	75910

Table 4 강성 변화

	K1	K2
최적화 전	0.56 E7	0.48 E7
최적화 후	0.42 E7	1.37 E7

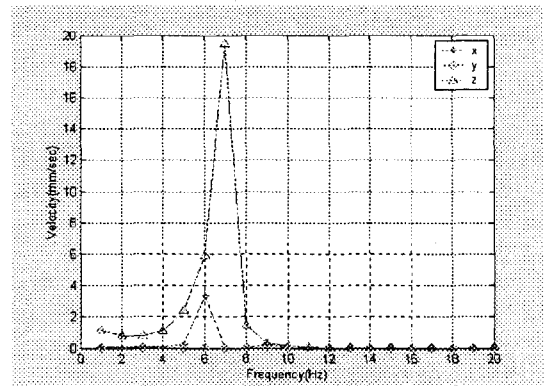


Fig.9 Vibration Response Due to Base Motion before Optimization

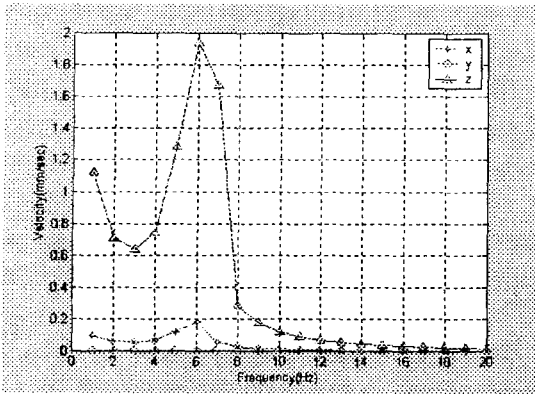


Fig.10 Velocity under Mount due to Base Motion

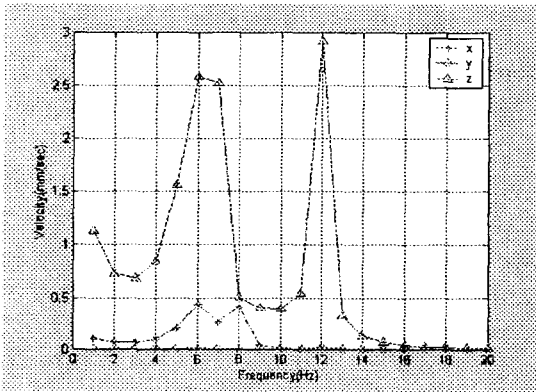


Fig.11 Vibration Response Due to Base Motion after Optimization

## 6. 결론

본 연구에서는 선내 탑재 마운트 시스템의 성능을 평가하고 설계를 변경할 수 있는 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 다음과 같은 기능을 가지고 있다.

(1) 마운트 시스템의 고유진동해석, 전달을 계산 및 강제진동응답 계산을 이용하여 선내 탑재 마운트 시스템의 성능을 평가할 수 있다.

(2) 시운전시 마운트 시스템에서 과도진동이 발생할 경우, 고유진동수를 이동하여 공진회피 설계가 가능하다.

(3) 마운트 초기 설계시 유전자알고리즘을 이용한 마운트 최적설계프로그램을 이용하여, 선내 주 기진원에 의한 마운트하부 변위가진 특성을 고려한 마운트 최적설계 프로그램을 개발하였으며, 실선에 적용하여 그 효용성을 입증하였다.

(4) 향후 최적설계프로그램을 적용의 범위를 넓히기 위해서, 시운전시 선종별 마운트하부 변위가진력의 측정을 통한 data base구축이 필요하며, 마운트의 비선형 특성 및 계측에의한 마운트의 동특성 추출에 관한 연구가 추후 과제로 남아있다.

## 참고문헌

- [1] 조연, 김병곤 "선내 탑재 장비용 방진 마운팅 시스템 개발", 고등기술연구원 보고서, 2001.2.
- [2] 김용대, 이신복, "아이들 진동 저감을 위한 엔진 마운트 최적설계", 2000 MSC Conference Proceedings, pp.153~160, 2000
- [3] 이유진, "전문기동차의 엔진마운트 최적화에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1987
- [4] 황인수, 김태욱, "차체의 유연성을 고려한 엔진 마운트 최적설계", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp.319~325, 1997
- [5] 허덕재, 장한기 "대형 엔진의 마운트 최적설계를 위한 고찰", 한국소음진동공학회지 제6권 3호, pp.274~285, 1996.
- [6] 황인수, "Lanos의 Engine Mount 최적설계", 제어 자동화 시스템공학회지 2권 6호, pp.14~18, 1996.11
- [7] Bavid Beasley, "An Overview of Genetic Algorithms", University Computing, 1993,
- [8] Peter Ross, "About PGA v2.9", 20 March 1996
- [9] David A Coley, "An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers", World Scientific