

탄성 마운트 장착 디젤 발전기 세트의 진동 특성과 예방에 대한 연구

Vibration characteristics of diesel generator set with resilient mount and prevention of vibration on the design stage

이군희* · 배종국* · 이수목*

Kun-Hee Lee, Jong-Gug Bae and Soo-Mok Lee

Key Words : Resilient Mount, Diesel Generator Set, Rigid Body Mode

ABSTRACT

Diesel generator sets with resilient mounts often experience resonances by major excitations which come from diesel engine and their foundation with rigid body modes. Because their natural frequency is determined by moment of inertia and stiffness of resilient mount, vibration problems are resolved by changing location and stiffness of resilient mounts. But the calculated natural frequencies are inaccurate due to uncertainty of the inertia and mount stiffness. So this result can be useless on the design stage. In this paper, the stiffness of mount is evaluated on result from mount stiffness test in laboratory and generator set vibration test, and a simple calculation method for moment of inertia is proposed. Based on these data, the procedure to select optimized mount stiffness and location on the design stage is set up.

기호설명

- [M]: 질량 행렬
- [K]: 강성 행렬
- {X}: 병진 변위 및 회전 변위 행렬
- {F}: force & moment vector
- m: 질량
- kx, ky, kz: 마운트의 강성
- lxx, lyy, lzz, lxy, lyz, lzx: 관성 모멘트
- dx, dy, dz: 무게 중심으로부터의 마운트 위치

1. 서론

중형 디젤 엔진 (medium speed diesel engine) 장착 발전기 세트에서 발생하는 진동 문제는 대부분 발전기 세트의

고유 모드의 공진에 의해서 발생한다. 고유 모드는 발전기 세트의 하부 지지 구조의 영향을 많이 받으며 근래에 들어서는 대부분 탄성 마운트를 사용하지만 일부 볼트를 이용하여 고정하는 경우도 있다.

탄성 마운트로 고정하면 발전기 세트로부터 하부지지구조로 전달되는 고체음은 크게 감소하므로 균함과 같은 특수한 용도를 제외하고는 고체음에 의한 문제가 거의 발생하지 않는 장점이 있으나 발전기 세트와 하부지지구조가 분리되어 유연해지므로 볼트로 고정하는 경우에 비해 상대적으로 진동 문제가 많이 발생한다. 이 때 진동 문제를 야기하는 주요 모드로는 발전기 세트와 마운트가 각각 질점과 spring처럼 거동하는 강체 모드와 발전기 세트 구조의 변형이 발생하는 변형 모드가 있다.

강체 모드에 의한 진동 문제는 디젤 엔진의 저차 기진력이나 선박용으로 사용되는 경우 선박으로부터 전달되는 기진력과의 공진에 의해 발생하므로 고유진동수를 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 고유진동수 계산은 마운트의 강성과 발전기 세트의 관성 모멘트만 알면 이론적으로 매우 간단하지만 이를 정확히 평가하기가 쉽지 않아서 이들 값을 실험적으로 구하는 연구가 진행되었다.(1)(2)(3) 그러나 이

* 현대중공업 선박해양연구소
E-mail : LKH10@hhi.co.kr
Tel: (052)230-7401, Fax: (052)230-5485

러한 연구는 대량 생산하는 제품에 대해서는 적합하나 진동 문제를 결정하는 여러 특성들이 제품마다 바뀌는 주문 생산 제품에 대해서는 부적합하다.

중형 디젤 엔진을 사용하는 발전기 세트는 주문 생산 방식이므로 발주처의 요구에 따라 설계 변경이 많고 선박용 발전기로 사용되는 경우는 선체로부터의 기진력과 공진에 의해 진동 문제가 발생하는 경우가 많고 이 때의 기진력은 선박의 종류에 따라 바뀌게 된다. 이를 회피하기 위해서는 설계 단계에서 적절한 마운트를 선정하여야하기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다.(4)(5)

본 논문에서는 장기간에 걸친 계측 자료를 기반으로 발전기 세트의 강제 모드에 의한 진동 특성을 규명하고 이에 대한 대비책을 제시하였다. 특히 마운트의 동강성을 평가하는 방법과 공진이 발생하는 고유 모드-기진력 조합을 제시하여 효율적인 공진 회피를 도모하였다.

2. 강제 모드에 의한 진동 특성

2.1 고유 모드 및 지배방정식

강제 모드 계산을 위해서는 발전기 세트는 질점으로, 마운트는 회전 강성을 무시한 spring으로 모델링하며 그림 1에 간략하게 나타내었다. 감쇠를 무시한 지배방정식은 다음과 같다. 여기서 마운트의 위치는 좌우 대칭이고 높이도 모두 동일한 것으로 가정하였다.

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m & & & & & \\ & m & & & & \\ & & m & & & \\ & & & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ & & & -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ & & & -I_{xz} & -I_{yx} & I_{zz} \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 & 0 & k_y d_x & -k_z d_y \\ 0 & k_y & 0 & -k_z d_x & 0 & k_x d_x \\ 0 & 0 & k_z & k_x d_y & -k_z d_x & 0 \\ 0 & -k_x d_x & k_x d_y & k_x d_x^2 + k_y d_x^2 & -k_z d_x d_y & -k_x d_x d_x \\ k_x d_x & 0 & -k_z d_x & -k_x d_x d_y & k_x d_x^2 + k_y d_x^2 & -k_x d_x d_x \\ -k_x d_x & k_x d_x & 0 & -k_x d_x d_x & -k_x d_x d_x & k_x d_x^2 + k_y d_x^2 \end{bmatrix}$$

위 방정식을 계산하면 6개의 고유 모드가 얻어지는데 좌우 병진 운동인 sway mode와 rolling mode가 연성되어 발생하는 모드를 각각 1차, 2차 rolling mode라 칭하고 전후 병진 운동인 surge mode와 pitching mode가 연성되어 발생하는 모드를 각각 1차, 2차 pitching mode라 칭한다. 그리고

bounce mode와 yawing mode는 연성되지 않는다. 이러한 모드의 고유진동수는 일반적으로 4~20 Hz의 범위에 분포한다.

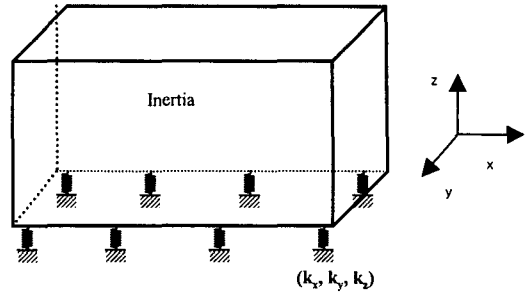


Fig. 1. 강제 모드 계산을 위한 모델링

2.2 주요 기진력

발전기 세트 진동에 영향을 주는 주요 기진력은 발전기 세트의 디젤 엔진에서 발생하는 기진력과 선박용 발전기 세트의 경우 하부지지구조로부터 전달되는 기진력이 있다. 중형 엔진 장착 발전기 세트의 회전속도는 720, 750, 900, 1000 RPM이므로 디젤 엔진의 0.5차와 1차 기진력과 공진이 문제되고 선박용 발전기 세트에서는 선박의 propeller나 주기판에서 발생하는 기진력과 공진도 문제가 된다.

디젤 엔진에서 발생하는 기진력은 주로 흡수 기통수 엔진에서 문제가 발생한다. Table 1에 기통수별 문제가 발생하는 기진력-고유 모드 조합을 제시하였으며 Figure 2에 진동 문제가 발생한 경우의 진동 측정 결과를 도시하였다.

Table 1. 진동문제 발생 기진력-고유모드 조합

No. of Cyl.	5	6	7	8	9
1st roll	-	-	-	-	-
1st pitch	-	-	-	-	-
Yaw	1st	-	1st	-	0.5th
Bounce	-	-	-	-	-
2nd pitch	1st	-	1st	-	1st
2nd roll	1st	1st	1st	1st	1st

선박에서 발생하는 기진력에 의해 발생하는 진동 문제는 선박의 종류에 따라 특성이 많이 바뀐다. 초대형 유조선에서는 propeller 기진력이, 150,000톤급 유조선에서는 주기판 기진력이 주로 문제되며 컨테이너 운반선의 경우 진동 수준을 완전히 무시할 수는 없으나 심각한 진동문제가 발생하는 경우가 드물다. Figure 3에는 propeller 기진력에 의해 정지 중인 발전기 세트에서의 진동 계측 결과를 나타내었다.

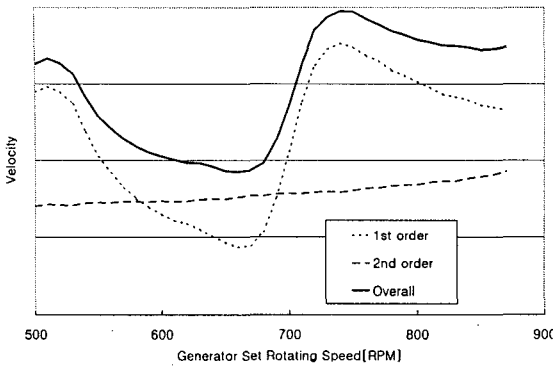


Fig. 2. 엔진 기진력에 의한 진동(idle load)

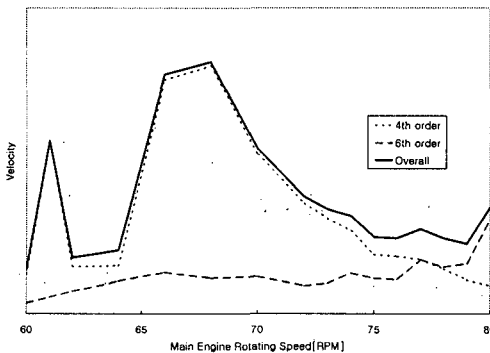


Fig. 3. 선박 기진력에 의한 진동

3. 마운트의 동강성

탄성 마운트의 강성은 정강성, 동강성, 음향 강성이 있다. 정강성은 정적 변위 계산에 사용되며 음향 강성은 고체 음 전달 특성 평가에 사용된다. 동강성의 경우 강제 모드에 의한 진동 특성에 큰 영향을 미치며 설계 단계에서 고유 진동수를 계산하기 위해서는 정확한 마운트 동강성을 파악하는 것이 필수적이다. 그러나 마운트의 동강성은 정적 하중, 진동수, 변위에 의해 바뀌어서 정확하게 평가하기 어렵다.

경우에 따라서는 마운트 제조사의 동강성 data도 정확하지 않은 경우도 있는데 이를 기반으로 계산한 고유진동수가 실험에서 구한 고유 진동수와 차이를 보이기도 한다. Figure 4에 충격 시험 결과와 제조사 계산 값을 비교하였다. 관성 모멘트의 영향을 받지 않는 bounce mode의 고유진동수가 약 7% 차이가 나는 것을 비롯하여 전체적으로 강성이 과소평가된 경향을 보인다.

마운트의 동강성을 평가하기 위해서는 발전기 세트의 충격 시험과 진동 시험 결과, 실험실에서 측정된 마운트 동강성 특성을 이용하였다. 처음에 충격 시험 결과 중 마운트의 동강성과 질량에 의해서만 고유진동수가 결정되는 bounce mode의 고유진동수로부터 마운트의 동강성을 역산한다. 그

리고 정적 하중과 주파수에 의한 강성 변화는 실험실에서 측정된 마운트 동강성 측정 data를 기반으로 고려하였다. 정적 하중에 의한 변화는 변화율이 크므로 반드시 고려해야 하고 주파수에 의한 변화는 상대적으로 변화율이 적어서 고려하더라도 고유진동수에 영향은 크지 않았다. Table 2에 제안된 방법에 의해 진동수를 계산하고 충격 시험 결과와 비교하였다.

Table 2. 고유진동수 계산 예시

표준하중	23 kN
표준강성	7620 kN/m
강성변화률	-13.5[(kN/m)/kN]
실제 하중	27 kN
적용 강성	7566 kN
계산값 (bounce mode)	8.32 Hz
충격시험결과 (bounce mode)	8.7 Hz
오차	-4.5 %

여기에서 도출된 고유진동수는 충격 시험 기준이다. 그러나 마운트의 동강성은 진폭의 변화에 의해 바뀌므로 충격 시험과 같이 진폭이 극히 작은 경우에 도출된 고유진동수와 실제 진동에서 발생하는 고유진동수는 차이가 날 수 밖에 없으며 이 차이는 장기간에 걸친 측정 data에서 추출한 보정값을 이용하여 반영하였다. 진폭이 증가하면 강성이 낮아지므로 실제 진동시험에서 도출된 고유진동수 값이 충격 시험 결과에 비해 약 5~10%가량 낮다.

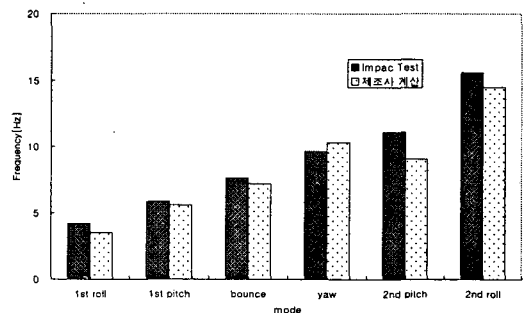


Fig. 4. 충격 시험과 마운트 제조사 계산 결과와의 비교

4. 관성모멘트 계산 및 최적의 마운트 선정

4.1 관성모멘트 계산

관성 모멘트는 3차원 CAD system이 갖추어지면 설계 data를 기반으로 쉽게 구할 수 있다. 그러나 CAD system

이 갖추어지지 않거나 발전기와 같이 조립 과정에서 외부에서 납품되는 경우는 정확한 관성 모멘트를 알기 어렵다. 그리고 전술한 바와 같이 주문 생산 방식의 경우 발주처의 요구에 따라 설계 변경이 빈번하게 이루어지므로 설계 변경 때마다 관성 모멘트 변경을 반영하여야 한다.

여기에서는 구조 부분의 관성 모멘트는 표준이 되는 관성 모멘트를 설계 자료를 기반으로 FEM model를 이용하여 추출하고 설계 변경에 따른 관성 모멘트의 변화는 질량 변화에 따라 선형적으로 변화한다고 가정하여 반영하였다. 그리고 flywheel이나 발전기 rotor와 같이 변화가 큰 것은 설계자료로부터 약산식을 이용하여 계산하였다.

4.2 최적 마운트 종류 및 위치 선정

질량 행렬과 강성 행렬이 정해지면 쉽게 고유진동수를 계산할 수 있다. 따라서 계산된 고유진동수가 기진력의 주파수와 공진을 일으키지 않도록 마운트의 종류와 위치를 선정하여야 한다.

일반적으로 사용하는 마운트의 종류는 45종이며 마운트의 위치 조합은 이론적으로는 수없이 많으나 실질적으로는 설치상의 제한으로 인하여 최대 수백 가지를 넘지 않는다. 따라서 가능한 마운트 종류와 위치의 조합은 수천가지 이내이므로 이 조합의 고유진동수를 모두 계산하여 기진력의 주파수로부터 얼마나 떨어져 있는지를 평가하여 진동 회피 가능성이 가장 큰 마운트의 종류와 위치 조합을 선정한다.

디젤 엔진에 의한 기진력은 0.5차와 1차 기진력만을 고려하였으며 선박으로부터의 기진력은 propeller 기진력과 주기관의 실린더 차수 기진력만을 고려하였다. 기진원이 여러개인 경우 과거 측정 자료와 기진력의 상대적 크기로부터 각 기진력에 대한 가중치를 정하여 최적의 공진 회피를 할 수 있도록 하였다.

최종적으로 일련에 과정을 프로그램으로 만들어 쉽게 최적의 마운트 종류 및 위치 조합을 선정할 수 있도록 하였다. Figure 5에 프로그램의 대화창을 도시하였고 간단한 설계 자료에서 구할 수 있는 data만 입력하면 최적의 조합을 찾을 수 있도록 하였다.

5. 결론

탄성 마운트 장착 발전기 세트의 경우 강제모드에 의한 진동 문제가 발생하고 이를 해결하기 위해서 마운트의 종류와 위치를 적절히 선정하여 공진을 회피하여야 한다. 그러나

마운트의 동강성이 불명확하고 이론적으로 기진력이 정확하게 파악되지 않아서 설계단계에서 공진을 회피할 수 있는 마운트 종류와 위치 선정에 실패하여 진동 문제가 발생하는 경우가 종종 발생한다. 이를 해결하기 위해서 장기간에 걸친 진동 측정 자료를 기반으로 진동 문제의 가능성이 큰 기진력-고유 모드 조합을 선정하였고 마운트의 강성 평가를 제시하였다. 이러한 자료를 기반으로 최적의 마운트의 위치와 종류를 선정하는 방법을 제시하였다.

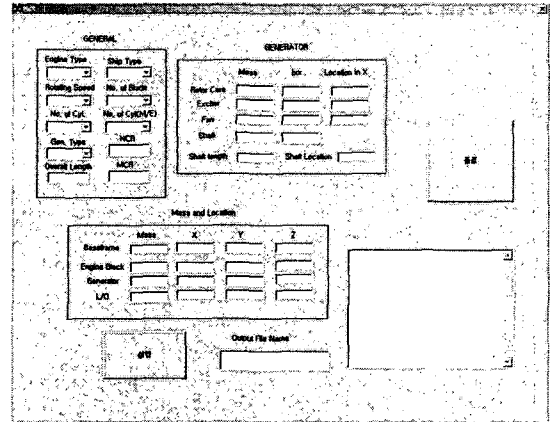


Fig. 5. 마운트 종류, 위치 선정 프로그램 대화창

참고 문헌

- (1) 정경렬 등, 1988, "실험적 모우드 해석을 통한 엔진 마운트계의 동역학적 모델링" 한국자동차공학회지 Vol 10, No. 2, pp 39~45.
- (2) P. Conti and J. Bretl 1989 "Mount stiffness and inertia properties from modal test data" Transactions of ASME Vol. 111, April pp 134~138.
- (3) 박석태, 1991, "실험적 모우드 해석법에 의한 엔진관성 제원 및 마운트 고무 스프링 상수 규명" 한국자동차공학회 춘계학술대회, pp 53~62.
- (4) 김극수 등 2002, "실험 모델을 이용한 마운팅 시스템의 동특성 연구" 대한조선학회 추계학술대회, pp 490~493.
- (5) 최수현 등, 2002, "선내 탑재 장비용 마운팅 시스템의 진동 특성 평가에 관한 연구", 대한조선학회논문집 39권 제 1호 pp 73~81.