

고무마운트를 통한 장비의 고체음 전달에 관한 연구

^o김봉기*, 김재승*, 김현실*, 강현주*, 김상렬*

Study on the Structure-borne Sound Transmission of a Machine through Rubber Mounts

Bong-Ki Kim, Jae-Seung Kim, Hyun-Sil Kim, Hyun-Joo Kang, and Sang-Ryul Kim

ABSTRACT

Machines on board a ship are mounted on decks and transmit its structure-borne sound to the deck through resilient mounts. To predict the ship noise generated by the structure-borne sound of the machine, It is necessary to estimate the vibration level of the base structure. In this paper, a simple dynamic model is considered for vibration isolation systems consisting of a source, an isolator, and a base structure. The high frequency mobilities of the simple base structure are reviewed and wave effects in the mount are discussed in relation to isolation performance.

1. 서론

통계적 에너지 해석법(SEA: Statistical Energy Analysis)은 선박 소음의 해석을 목적으로 1970년대 중반 이후부터 지금까지 활발히 사용되고 있으며, 설계 단계에서의 선실 소음 예측 및 그 저감 대책을 위한 기본 자료를 제공하고 있다.[1] 특히 선실 소음의 경우 선박의 가치를 판별하는 주요 척도로써 기준레벨이 점차 강화되고 있으며, 이에 따라 설계단계에서의 정확한 소음레벨 예측이 절실히 요구되고 있다.

선실소음 예측을 위해서는 SEA 요소를 정의하고 각 요소간의 관계를 설정하는 모델링

작업이 필요하며, 이와 함께 SEA 해석 시 입력 파워에 해당되는 소음원 장비의 고체음(Structure-borne Sound) 및 공기음(Air-borne Sound) 출력을 알아야 한다. 특히 고체음의 경우, 장비 제작업체에서 제공하는 진동레벨로부터 진동절연체와 지지부의 특성에 의한 진동량의 전달률(Transmissibility)을 경험적으로 고려하여 장비 하부 판 요소의 고체음을 산정하는 것이 일반적이다.[2]

장비의 고체음 측정조건은 강성이 큰 지지부(Foundation)와 장비의 사이에 resilient 마운트를 설치한 후 진동레벨을 측정하도록 되어 있다. 이것은 지지부와 마운트의 특성이 장비의 진동레벨에 영향을 주지 않도록 고려한 것으로, 실제 선박에 장착될 경우 마운트

* 한국기계연구원 음향연구그룹

와 지지부 특성에 의해 구조물로 전달되는 고체음은 변하게 된다. 따라서, 입력으로 사용되는 장비 하부구조물의 고체음 레벨을 정확하게 예측하기 위해서는 장비 탑재시 사용되는 마운트와 지지부의 특성을 파악하는 것이 필요하다

통계적 에너지 해석법은 일정 주파수 대역에서의 평균적인 거동을 예측하는 방법이므로 고주파 해석법을 통한 평균적인 진동전달률을 예측하는 것이 의미 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 점탄성 재료로 만들어진 볼록형상 마운트의 특성과 지지부의 특성에 따라 고체음의 진동전달률 변화를 예측하고 전달률 감소를 위한 방안에 대하여 논하고자 한다.

2. 진동 전달률

일반적인 고체음의 절연은 그림 1 과 같이 진동하는 장비와 지지부 사이에 진동절연체를 설치함으로써 이루어지며, 간단히 가진부, 절연부 및 수신부로 모델링할 수 있다. 만일 상하 방향의 운동만이 주요 가진원이고, 서로 한 점으로 접촉된 전달선(Transmission Line)을 고려하면, 그림 2로부터 다음과 같이 단일 주파수에 대한 운동 방정식을 고려할 수 있다.

$$F = Z_m v_m + Z_i (v_m - v_r), \quad (1-a)$$

$$0 = Z_r v_r - Z_i (v_m - v_r). \quad (1-b)$$

여기서, 임피던스는 일반적으로 질량, 댐핑, 강성의 영향을 포함하고 있다. 식 (1)로부터 가진부의 입력 모빌리티와 수신부의 출력 모빌리티는 다음과 구할 수 있다.

$$\frac{v_m}{F} = \frac{Z_i + Z_r}{Z_m Z_i + Z_i Z_r + Z_r Z_m} \quad (2-a)$$

$$\frac{v_r}{F} = \frac{Z_i}{Z_m Z_i + Z_i Z_r + Z_r Z_m} \quad (2-b)$$

장비의 진동속도로부터 지지부의 진동속도를 예측하기 위해서는 진동속도의 전달률이 필요하며, 식 (2)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{v_r}{v_m} = \frac{Z_i}{Z_r + Z_i} \quad (3)$$

3. 입력 임피던스와 장비의 자유속도

고체음의 전달률을 감소시키기 위해서는 가진부의 질량과 절연체의 강성에 의한 시스템의 공진 주파수를 가청 주파수보다 충분히 낮게 설계되는 것이 바람직하며, 이는 절연체의 임피던스가 가진부의 임피던스보다 충분히 작아야 함을 의미한다. 따라서, 가진주파수가 시스템의 공진 주파수보다 충분히 큰 경우 입력 임피던스는 다음과 같이 단지 가진부의 특성 임피던스만으로 표현 가능하다.

$$\left. \frac{F}{v_m} \right|_{Z_m \gg Z_i} \cong Z_m = j\omega M. \quad (4)$$

이로부터, 다음과 같이 가진부의 자유속도(Free Velocity)를 정의할 수 있다.

$$v_o = v_m \Big|_{Z_m \gg Z_i} = \frac{F}{j\omega M}. \quad (5)$$

자유속도는 가진부의 진동이 절연체에 의해 구속받지 않았을 때의 진동속도이며, 절연체와 수신부의 임피던스 특성과는 관계가 없다.

4. 평판의 모빌리티

일반적인 수진부의 형상은 빔 또는 평판의 조합으로 이루어지며, 여기서는 이론적 편이상 단순한 평판 형상에 대해서 고찰하였다. 일반적으로 deck을 구성하는 SEA 평판 요소는 고체음의 주요 관심주파수 영역에 해당되는 가청 주파수 내에서 평판의 공진으로 인해 수많은 피크들이 나타나며, 이러한 고주파수 영역에서의 구조물 동특성은 개별적 주파수에서의 특성보다는 주파수 밴드 개념에서의 전체에너지 특성이 물리적으로 더 의미 있다고 할 수 있다. 또한, 평판과 같은 연속체는 그 특성상 고주파수 영역에서는 경계조건에 관계없이 무한 구조물의 모빌리티와 같은 값을 갖는다는 것은 이미 잘 알려져 있다.

무한 평판의 경우 모빌리티는 다음과 같다.[3]

$$M_r^{inf} = \frac{1}{8\sqrt{B\rho h}}, \quad B = EI/(1-\nu^2). \quad (6)$$

한편 저주파수의 경우 공진주파수가 고주파대역에 비하여 비교적 잘 분리되어있고, 산과 골이 구조물의 특성 임피던스에 비해 상당히 크거나 작기 때문에 평균적인 값 보다는 실제 구조물의 모빌리티를 쓰는 것이 바람직하다. 그러나 일반적으로 복잡한 형상의 경우 정확한 모빌리티를 산정하는 것은 수치해석적 방법 이외에는 불가능한 일이므로 간단히 산과 골의 envelope만을 추출할 수 있다면 저진동 설계를 위한 입력자료로서 충분하다 할 수 있다. Williams[4]는 저주파에서는 모빌리티의 상한선을 고주파에서는 특성모빌리티로 수렴할 수 있는 평판의 모빌리티 관계식

을 다음과 같이 유도하였다.

$$M_r = \frac{1}{8\rho h\alpha} \coth\left(\frac{\omega\eta l_1 l_2}{32\alpha}\right), \quad (7-a)$$

$$\alpha = \frac{c_1 h}{\sqrt{12(1-\nu^2)}}. \quad (7-b)$$

그림 3은 식 (7-a)가 저주파에서는 모빌리티 최대값을 저주파에서는 특성 모빌리티로 수렴하고 있음을 보여주고 있다.

5. 고무 마운트의 파동효과

진동절연체는 개념적으로 가진부와 수진부 사이의 큰 임피던스 부적합(Impedance Mismatch) 조건을 만들어 고체음의 차단 효과를 얻는다. 그림 4와 같은 블록형상의 마운트 전후로 전달되는 힘과 속도와의 관계는 다음과 같이 임피던스 행렬로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_m \\ F_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_m \\ v_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

절연체 내부의 공진을 고려하지 않아도 되는 저주파의 경우 임피던스는 다음과 같이 복소 탄성계수로 표현할 수 있다.

$$Z_{21} = -Z_{22} = \frac{k(1+j\eta_i)}{j\omega} \quad (9)$$

그러나, 일부 마운트의 경우 일정 주파수 이상에서 절연체 내부의 파동 전파로 인해 전달률이 증가함이 알려져 있으며, 이를 고려하기 위해 블록형 시편의 파동 전파를 고려한 임피던스 행렬을 다음과 같이 구할 수 있다.[5]

$$\begin{pmatrix} F_m \\ F_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_i \beta \cot \beta & m\omega^2 \frac{\sin \beta}{\beta} - k_i \beta \frac{\cos^2 \beta}{\sin \beta} \\ k_i \beta \frac{1}{\sin \beta} & -k_i \beta \cot \beta \end{pmatrix} \times \frac{1}{j\omega} \begin{pmatrix} v_m \\ v_r \end{pmatrix} \quad (10-a)$$

$$\text{여기서, } k_i = \frac{E_i A}{l} \text{ and } \beta = \frac{\omega}{c_i} l. \quad (10-b)$$

여기서 m 은 시편의 질량, A 는 절연체의 단면적, l 은 길이, c_i 은 시편 내 종파의 속도를 의미한다. 이로부터, 속도 전달률을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{v_r}{v_m} = \frac{k_i \beta}{j\omega \sin \beta} \left/ \left(Z_r + \frac{k_i \beta}{j\omega \tan \beta} \right) \right. \quad (11)$$

그림 5는 파동효과를 고려한 전달률을 나타내며, 단순히 복소탄성계수를 고려한 경우에 비해 고주파수 대역에서 그 전달률이 크게 증가함을 알 수 있다. 특히 경험적으로 사용되는 고체음 전달률[2]과 고주파수 영역에서 유사한 경향을 보이고 있다. 한편, 고무 마운트의 파동효과가 고려된 장비의 고체음 레벨은 다음과 같다.

$$v_m = \frac{Z_r + Z_{i\beta}}{Z_m(Z_r + Z_{i\beta}) + Z_r Z_{i\beta} + Z_i m \omega^2} F \quad (12-a)$$

$$\text{여기서, } Z_{i\beta} = Z_i \beta \cot \beta. \quad (12-b)$$

식 (2-a)와 비교하면, 파동효과에 의한 절연체의 임피던스 변화와 함께 식 (12-a)의 분모에 절연체의 질량효과가 부가되어 장비의 고체음 레벨을 감소시키고 있음을 볼 수 있다. 그림 6은 파동효과를 고려할 경우 장비의 실제 진동속도가 자유속도와는 큰 차이가 발생할

수 있음을 보여주고 있다. 절연체 내부 공진에 의한 전달률의 증가는 재료의 탄성계수와 손실계수에 큰 영향을 받으며, 세가지 고무에 대하여 전달률을 예측한 결과를 그림 7에 나타냈다. 파동효과가 발생하는 주파수 이하에서는 탄성계수의 증가로 인해 전달률이 증가하나, 고주파수 영역에서는 절연체 내부의 손실계수 증가로 인해 전달률이 감소하고 있음을 볼 수 있다.

6. 결론

선박에 탑재되는 장비의 고체음이 고무 마운트를 통해 하부 지지 구조물로 전파될 때, 진동 전달률과 장비 자체의 고체음 레벨을 변화를 해석하였다. 예제에 사용된 블록형상의 마운트는 내부 파동 효과에 의해 진동 전달률을 크게 증가시키며, 탑재된 장비의 고체음 레벨은 마운트 및 지지부의 동적 특성에 따라 변화함을 확인하였다. 또한, 진동 전달률 해석결과로부터 마운트 손실 계수의 증가는 고주파수 대역의 절연에 효과적이며, 마운트 강성의 감소는 저주파수 대역의 절연에 효과적임을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 김재승, 강현주, 김현실, 김상렬, "SEA에 의한 실선소음 예측 정도에 관한 고찰," 한국소음진동공학회 학술대회논문집, pp. 849-854 (2000).
- [2] R. W. Fisher *et. al.*, "Design Guide for Shipboard Airborne Noise Control," T&R Bulletin 3-37, SNAME, 1983.
- [3] Eugen Skudrzyk, "The Mean-value Method

of Predicting the Dynamic Response of Complex Vibrators," *J. Acoust. Soc. Am.* 67(4), pp.1105-1135 (1980).

- [4] A. T. Moorhouse and B. M. Gibbs, "Calculation of the Mean and Maximum Mobility for Concrete Floors," *Applied*

Acoustics 45, pp.227-245(1995).

- [5] Dr.-Ing. Eduard, C. Pestel and Frederick A. Leckie, *Matrix Methods in Elastomechanics*, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1963.

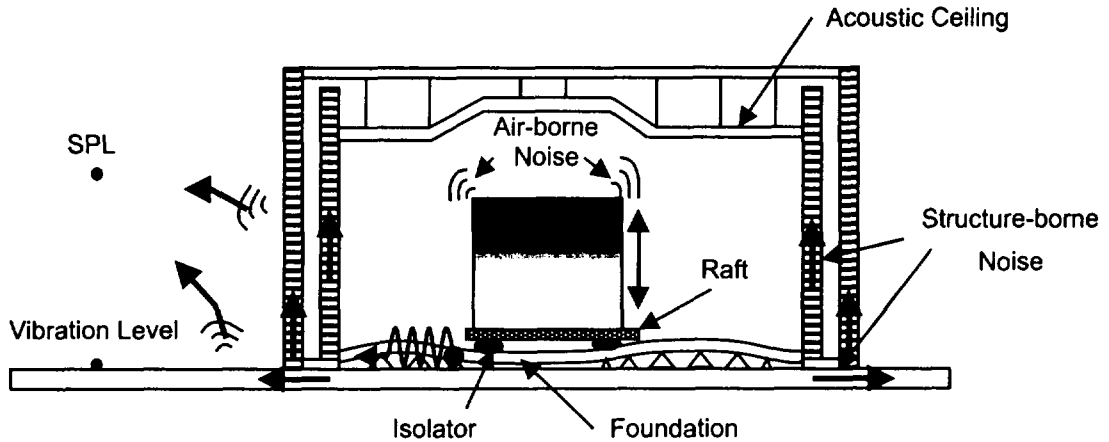


그림 1. 장비 진동에 의한 고체음의 전파.

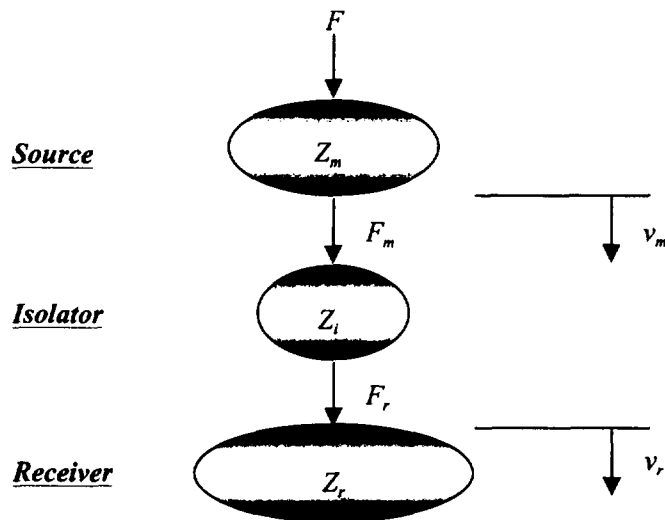


그림 2. Source-Isolator-Receiver 의 임피던스 모델링.

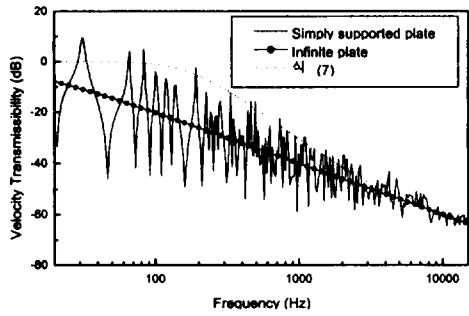


그림 3. 유한 평판과 무한 평판의 모달리티 비교.

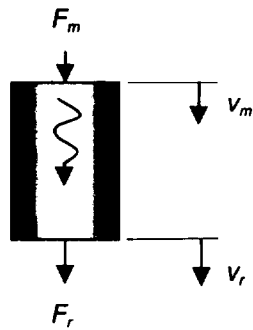


그림 4. 고무 절연체 내부의 파동 모델.

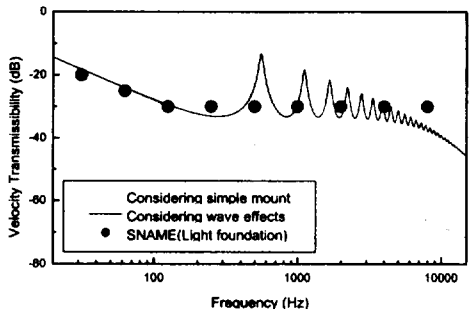


그림 5. 파동 효과를 고려한 진동 전달률.

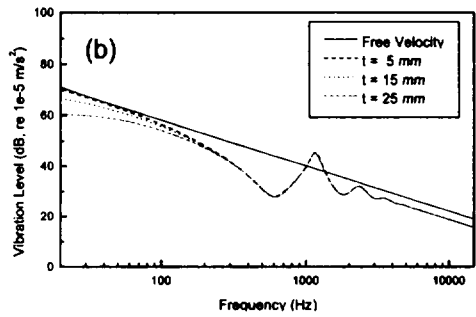
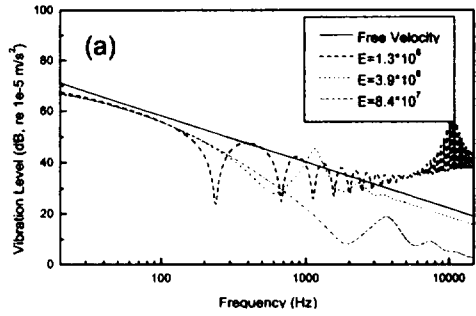


그림 6. 파동 효과를 고려했을 때 (a) 복소 탄성계수 및 (b) 지지부 평판 두께에 따른 장비의 고체음 변화.

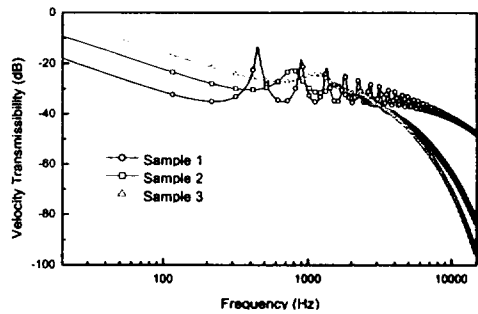


그림 7. 절연체의 복소 탄성계수 영향에 의한 전달률의 변화.