

탄성지지된 장비의 고체음저감 및 받침대 임피던스효과

⁰김현실*, 김재승, 강현주, 김봉기, 김상렬

SBN(Structure-borne Noise) Reduction of Resiliently Mounted Machinery and Effect of Foundation Impedance

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

Key Words: vibration reduction, resilient mount, impedance

ABSTRACT

In this paper, vibration reduction of resiliently mounted machinery and effect of the foundation impedance is studied. SBN (Structure-borne noise) reduction through the mount is analyzed by assuming that the system is modeled as a mass-spring system, while the impedance of the floor is included in the prediction. The comparison of the SBN difference through the mount between predictions and measurements show that the slopes are similar in the case of single-mount system, while the measurements differs significantly from the predictions in the case of the double-resilient system.

1. 서 론

진동저감을 위해 장비하부에 탄성마운트를 설치하는 것은 널리 사용되는 방법으로 주로 단일탄성지지구조를 적용한다. 그러나 합정과 같은 특수한 경우에는 장비의 진동 즉 고체음(Structure-borne Noise)에 대한 규제 기준이 엄격하여 단일탄성지지구조로는 기준을 만족시킬 수 없어 이중탄성지지구조를 채택하는 경우가 많다. 특히 디젤엔진은 공기음을 줄이기 위해 차음상자(sound enclosure)를 씌우는 경우도 많은데 차음상자와 이중탄성지지구조를 묶어서 모듈화 하는 추세이다.

탄성마운트를 선택할 때에는 장비를 집중질량으로 보고 탄성마운트 스프링상수를 이용하여 고유진동수를 계산하고 장비의 가진주파수와의 간격을 체크하는 것이 현재 사용되는 방법이다[1]. 이 과정에서 바닥은 강성이 무한대로 커서 rigid floor로 가정하는데 실제로는 장비 받침대는 유한한 강성을 갖는다. 특히 선박의 경우는 받침대가 앵글구조로 되어 있어서 선체 바닥이나 측면에 고정하며 높이가 0.5 m - 2 m에 이르는 경우가 많으며 받침대의 유연한 거동을 무시할 수 없는 상황이다.

본 논문은 이중탄성지지된 펌프류 장비의 진동저감을 다룬 2006년도 추계학술대회 발표논문[2]의 후속편으로 받침대 임피던스와 마운트 성능과의 관계를 다루었다.

* 한국기계연구원 음향.소음팀, hskim@kimm.re.kr

2. 탄성지지구조와 받침대의 영향

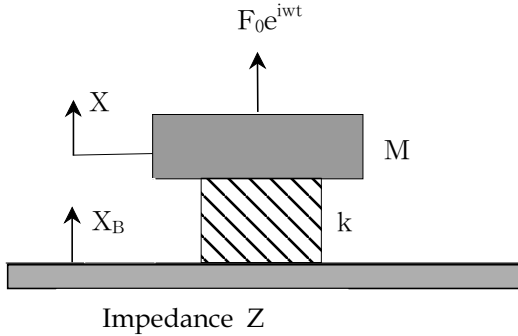


Fig. 1 Mass-spring system on the elastic floor with impedance Z

단일탄성구조

Fig. 1과 같이 장비(Mass M)가 스프링상수 k 인 마운트위에 놓여있고 바닥은 임피던스 Z 를 갖는 받침대라고 하면 장비가 F_0 의 가진력으로 진동할 때 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$(k - \omega^2 M)X - kX_B = F_0 \quad (1)$$

$$k(X - X_B) = Zj\omega X_B = F_{floor} \quad (2)$$

마운트하단에서 받침대에 가하는 힘을 F_{floor} 라고 하면 두 힘의 비는 다음과 같이 된다.

$$\frac{F_0}{F_{floor}} = 1 - \frac{\omega^2 M}{k} \left(1 + \frac{k}{Zj\omega}\right) \quad (3)$$

식 (3)에서 임피던스가 커질수록 강성이 큰 받침대를 의미한다. 스프링상수와 임피던스의 비가 식 (3)의 $q = |k/Zj\omega|$ 에 미치는 영향을 살펴보면 고주파수로 갈수록 크기는 점점 줄어들며 가장 낮은 주파수대역에 대해서 살펴보면 임피던스가 스프링상수의 5배만 되어도 오차는 31.5 Hz에서 0.1%에

불과하며 실용적인 면에서 10배만 되면 임피던스의 효과는 무시할 수준이다. 따라서 마운트의 성능이 제대로 발휘되는 임피던스의 값은 다음 식과 같이 주파수에 반비례하며 $-20\log(f)$ 의 기울기를 갖는다.

$$|Z| = C \frac{k}{2\pi f} \quad (4)$$

받침대의 고체음과 임피던스의 관계

식 (1), (2)에서 받침대의 변위와 가진력은 다음 관계를 갖는다.

$$X_B = \frac{F_0}{-\omega^2 M + (Zj\omega/k)(k - \omega^2 M)} \quad (5)$$

또한 변위의 비는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{X_B}{X} = \frac{1}{1 + (Zj\omega/k)} \quad (6)$$

식 (5)에서 임피던스가 클수록 마운트 하단의 고체음 X_B 는 작아지며 임피던스가 무한대로 가면 (rigid floor) 제로가 된다. 그러나 고체음 X_B 를 작게 하기 위해 받침대 임피던스 Z 를 지나치게 크게 할 수는 없는 노릇이다. 임피던스가 마운트 스프링상수의 10배가 되는 경우를 고려하면 31.5 Hz에서 변위의 비는 다음과 같이 된다.

$$20\log(|X_B/X|) \approx 20\log(10 \times 2\pi f) = 66 \text{ dB}$$

주파수가 커질수록 변위의 비는 옥타브당 6dB의 증가치를 보이므로 이론적으로는 바닥에 전파되는 고체음은 무시할 수준이다.

이중탄성구조

Fig. 2에는 이중탄성지지구조를 모델링한 그림

을 나타냈다.

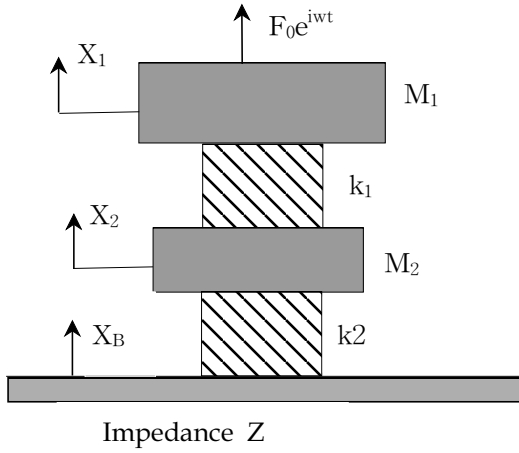


Fig. 2 이중탄성구조

바닥판의 임피던스를 Z 라고 하고 상부 질량을 M_1 , 하부 질량을 M_2 , 각 마운트의 탄성계수를 k_1 , k_2 라고 하고 하모닉 운동을 가정한 경우 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$(k_1 - \omega^2 M_1)X_1 - k_1 X_2 = F_0 \quad (7)$$

$$-k_1 X_1 + (k_1 + k_2 - \omega^2 M_2)X_2 - k_2 X_B = 0 \quad (8)$$

$$-k_2 X_2 + (k_2 + j\omega Z)X_B = 0 \quad (9)$$

식 (7)-(9)에서 변위는 다음과 같이 주어진다.

$$X_2 = F_0 k_1 (k_2 + j\omega Z) / \Delta \quad (10)$$

$$X_1 = F_0 [(k_1 + k_2 - \omega^2 M_2)(k_2 + j\omega Z) - k_2^2] / \Delta \quad (11)$$

$$X_B = F_0 k_1 k_2 / \Delta \quad (12)$$

여기서 Δ 는 식 (7)-(9)의 계수로 구성되는 matrix의 determinant이다. 바닥과 중간 받침대 변위의 비는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{X_B}{X_2} = \frac{1}{1 + (Zj\omega/k_2)} \quad (13)$$

식 (13)은 단일탄성구조의 변위의 비 식 (6)과

같으며 상부 질량과 스프링 상수 k_1 은 영향을 주지 않는다. 만일 바닥의 강성이 무한대 ($Z \rightarrow \infty$)라면 식 (10)-(12)은 다음과 같이 단순화 된다.

$$X_2 = F_0 k_1 / \Delta_\infty \quad (14)$$

$$X_1 = F_0 (k_1 + k_2 - \omega^2 M_2) / \Delta_\infty \quad (15)$$

여기서

$$\Delta_\infty = (k_1 - \omega^2 M_1)(k_1 + k_2 - \omega^2 M_2) - k_1^2 \quad (16)$$

장비는 콘크리트 바닥위에 철판을 깔고 그 위에 설치하였다. 바닥판은 주변이 단순지지된 길이 2 m, 폭 0.9 m, 두께 25.4 mm의 철판으로 가정하였고 포인트 임피던스를 접촉면적(1.5 m x 0.6 m)에 대해 평균하였다. 실제 장비바닥은 주변이 콘크리트로 고정된 정반 위에 철판(2 m x 0.9 m)의 철판을 얹은 상태로 정반과 철판이 얹힌 상태의 임피던스를 측정하였으며 Fig. 3에 측정값과 단순지지된 평판, 무한 평판의 임피던스값을 비교하였다. 평판의 경우 측정값은 단순지지된 평판의 임피던스값과 3150 Hz를 제외하고 잘 일치 하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4에는 합정용 펌프의 받침대 2종류(앵글 구조)의 임피던스 측정결과를, Fig. 5에는 디젤엔진 받침대(철판 용접구조)의 임피던스 측정결과를 보였다.

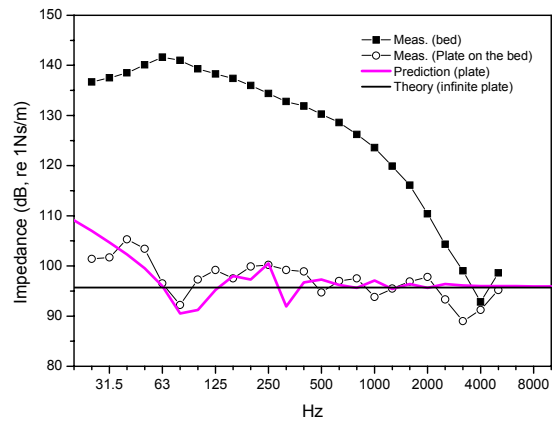


Fig. 3 임피던스값의 비교

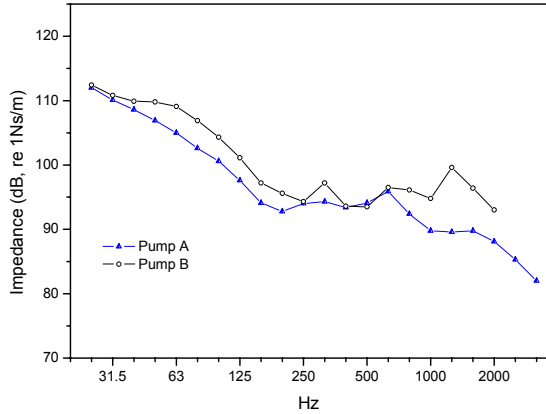


Fig. 4 선박용 펌프받침대의 임피던스 측정결과

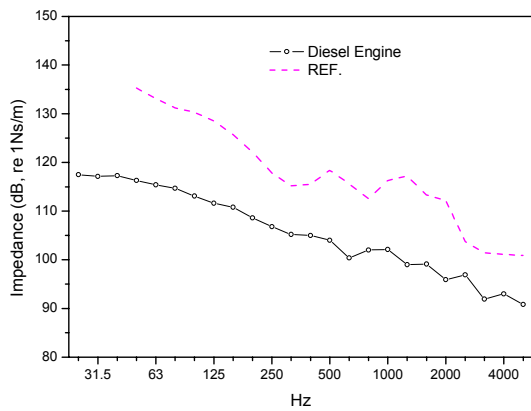


Fig. 5 선박용 디젤엔진 받침대의 임피던스 측정결과

Fig. 6에는 단일탄성지지되는 장비의 마운트 상하단의 고체음 차이를 측정된 값과 식 (6)의 예측값을 비교하였는데 예측에서 바닥판의 임피던스는 철판(두께 15mm, 25.4mm)을 가정하였다. 대체로 기울기는 같으나 측정값이 더 높게 나타난다. 고체음의 정의는 다음과 같다.

$$SBN = 20\log(\text{rms value} / 10^{-5} \text{ m/s}^2)$$

Fig. 7에는 이중탄성구조의 하부마운트 상하단의 고체음 차이를 측정된 값과 식 (6)의 예측값을 비교하였는데 하부 마운트는 이론예측과는 달리 뚜렷한 고체음 저감효과를 보이지 않는다.

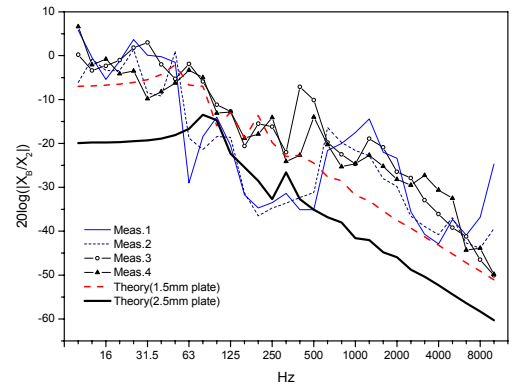


Fig. 6. 단일탄성지지구조의 고체음저감

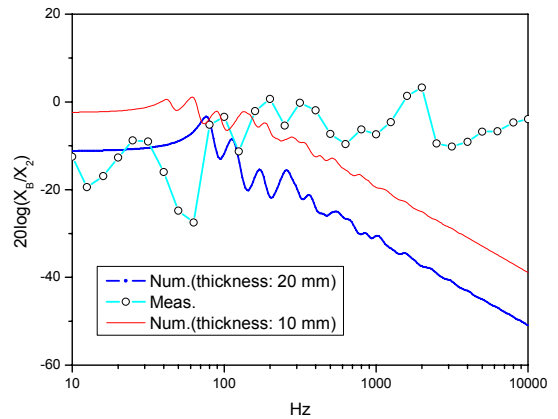


Fig. 7 이중탄성구조의 고체음 저감

결론

마운트 저감효과는 계측값과 해석모델의 결과가 큰 차이를 보이는데 가장 큰 이유로는 본 논문에서는 장비/베드를 단순한 집중질량으로 가정하였지만 실제로는 매우 복잡한 연속체 거동을 보이는 것에 기인하는 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] J. C. Snowdon, Vibration and shock in damped mechanical systems, John Wiley & Sons, INC, 1968.
- [2] 김현실외, "이중탄성지지된 펌프류장비의 소음. 진동 저감," 한국소음진동공학회 2006년도 추계학술대회 논문집.