한국소음진동공학회 2009년 춘계학술대회논문집, pp.511~517

방진 마운트의 동적 강성을 고려한 선체 바닥 및 받침대의 강성과 임피던스 규제에 대한 고찰

Investigation for the Restriction of the Stiffness and Mechanical Impedance of the Shipboard Floor and Foundation Considering Dynamic Stiffness of the Anti-Vibration Mount

한형석† · 손윤준*
Hyung-Suk Han and Yoon-Jun Son

Key Words : Dynamic Stiffness(동적 강성), Rubber Mount (고무 마운트), Mechanical Impedance(기계적 임피던스)

ABSTRACT

The mechanical impedance and stiffness of the foundation of shipboard equipments and hulls supported by anti-vibration mount are very important so that the anti-vibration mount can accomplish its performance effectively. But, it is frequently argued how much stiffness and mechanical impedance are necessary for those foundations and hulls. In this research, it is discussed by evaluating the dynamic stiffness of the commercial anti-vibration mounts used in a naval vessel. Consequently, in this research, the minimum level of the mechanical impedance and stiffness of the foundation of shipboard equipments and hulls are suggested considering the dynamic stiffness of the mount which varies as frequency.

1. 서 론

함정의 수중 방사 소음의 경우 공기 소음 보다는 구조 소음(Structure-borne noise)을 통해 선체를 가진 시켜 전달되므로 구조 소음의 중요성이 매우 높다고 할 수 있다. 따라서 수중 방사 소음에 영향을 미친다고 판단되는 대부분의 장비들은 공장 검사 및 시운전 시 이들의 구조 소음을 MIL-Std-740-2[(1)] 및 MIL-Std-167-1A[(2)]등을 가지고 엄격히 규제하고 있다. 또한 이러한 구조 소음이 선체로 전달되는 것을 방지하기 위해서 사용되는 마운트의 경우 MIL-Std-17185A[(3)]를 만족하는 마운트를 사용하도록 규제되고 있다. 하지만 이러한 마운트가 제대로 성능을 발휘하기 위해서는 이들을 받치고 있는 받침대 또는 선체가 충분한 강성을 가져야만 한다.

따라서 최근 건조되는 함정의 경우 이러한 바닥 받침대의 강성을 확인하기 위해서 받침대의 임피던스(Impedance)를 계측하고 이를 관리하기 위한 연구들이 진행되고 있다[(4-5)]. 하지만 이러한 받침대의 임피던스 계측은 일부 장비에 대해서만 적용되고 있으며 그 기준 자체도 모호한 상황이다.

이러한 임피던스 규제에 대한 물리적 의미를 생각해 볼 때 임의의 힘이 선체에 주어 졌을 때 최소의 진동(속도)을 가지기 위해서 임피던스는 충분히 큰 값을 가져야 함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한

† 교신저자; 정회원, 국방기술품질원 함정센터
E-mail : hshan@dtaq.re.kr
Tel : (055)680-6393, Fax : (055) 681-7447
* 국방기술품질원 함정센터

선체 또는 장비 받침대의 임피던스를 장비에 적용되는 마운트의 동적 강성(Dynamic stiffness)을 고려하여 어느 정도까지 규제하는 것이 타당한지에 대한 분석을 다루고자한다.

2. 바닥 받침대 임피던스와 강성

일반적으로 기계적 임피던스(Mechanical impedance)는 힘에 대한 속도의 주파수 응답함수로 식 (1)~(3)과 같이 표현할 수 있으며 물리적으로는 물체에 가해진 힘에 대해 얼마만큼 진동하는지에 대한 전달 특성의 기준으로 생각할 수 있다. 식 (1)은 임피던스의 정의, 식 (2)는 평균 임피던스, 식 (3)은 평균 임피던스의 대수적 표현이다.

$$Z = \frac{F}{V}(= \frac{K}{j\omega}) \tag{1}$$

$$Z_{avg} = \frac{[Z_1 + Z_2 + \bullet\ \bullet\ \bullet + Z_N]}{N} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} L_{Z_{avg}} &= 20\log(Z_{avg}/Z_0) \\ &= 20\log(2\pi f) - 20\log(a/F)_{avg} \\ &\quad [dB,\ \ Z_0 = 1Ns/m] \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 Z는 임피던스(Ns/m), K는 강성(Stiffness, N/m), Z_{avg}는 평균 임피던스(Ns/m), Z_N은 N점에서의 임피던스(Ns/m), N은 계측 지점수, L_{Zavg}는 평균 임피던스의 대수값, a는 가속도(m/s^2), F는 가진력(N), V는 속도(m/s), f는 주파수(Hz)이다.

마운트로 지지되어 있고 바닥 받침대가 설치되어 있는 장비의 경우 Fig. 1과 같이 장비 받침대의 변위와 장비의 변위만 고려한 2 자유도 모델로 표현할 수 있다. 이러한 2 자유도 모델에 대한 힘 평형식을 세우면 식 (4)~(5)와 같이 표현할 수 있으며 변위응답이 조화함수 형태($x=Xe^{j\omega t}$) 라고 두었을 때 식 (6)~(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{x}_f) + k(x - x_f) = F_0 e^{j\omega t} \tag{4}$$

$$k(x - x_f) + c(\dot{x} - \dot{x}_f) = F_f e^{j\omega t} \tag{5}$$

$$[(k - m\omega^2 + cj\omega)X - (k + cj\omega)X_f] = F_0 \tag{6}$$

$$k(X - X_f) + cj\omega(X - X_f) = F_f \tag{7}$$

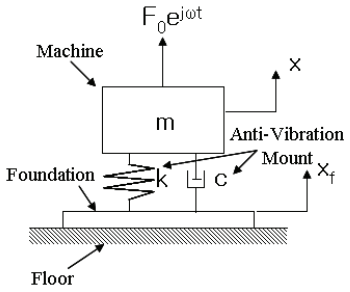


Fig. 1 2-D.O.F model for the equipment supported by resilient mount on the foundation

여기서 m은 장비의 무게, k는 적용된 마운트의 총 등가 강성, c는 감쇠 계수(Ns/m), X는 장비의 변위, X_f는 받침대의 변위, F_0은 장비의 가진력, F_f는 장비 받침대로의 전달력, ω는 주파수($=2\pi f$), Z_f는 장비 받침대의 임피던스, K_f는 장비 받침대의 강성이다.

또한 바닥에서의 힘은 식 (8)과 같이 바닥 받침대의 임피던스와 속도 또는 받침대의 동적 강성과 변위로 표현 할 수 있다.

$$F_f = Z_f V_f = Z_f(j\omega X_f) \cong K_f X_f \tag{8}$$

여기서 V_f는 F_f에 대한 바닥 받침대의 속도이다.
따라서 장비의 전달률(Transmissibility)은 식 (6)~(8)로부터 식 (9)~(10)과 같이 받침대의 임피던스 또는 동적 강성의 항으로 표현할 수 있다. 식 (9) 및 (10)에서 일반적으로 마운트의 강성(스프링 상수)이 감쇠계수에 비해 매우 크기 때문에 감쇠항은 무시할 수 있다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} \frac{F_0}{F_f} &= \left| \frac{(k - m\omega^2)X - kX_f + cj\omega(X - X_f)}{k(X - X_f) + cj\omega(X - X_f)} \right| \\ &= \left| 1 - \frac{m\omega^2}{k}(1 + \frac{k + cj\omega}{Z_f j\omega}) \right| \\ &\cong \left| 1 - \frac{m\omega^2}{k}(1 + \frac{k}{Z_f j\omega}) \right| \end{aligned} \tag{9}$$

$$\frac{F_0}{F_f}=\left|\frac{(k-m\omega^2)X-kX_f+cj\omega(X-X_f)}{k(X-X_f)+cj\omega(X-X_f)}\right| \quad (10)$$

$$=\left|1-\frac{m\omega^2}{k}(1+\frac{k+cj\omega}{K_f})\right|$$

$$\cong\left|1-\frac{m\omega^2}{k}(1+\frac{k}{K_f})\right|$$

식 (9)에서 진동 전달률을 장비 받침대의 임피던스 항으로 표현할 경우 $\left|\frac{k}{Z_f j\omega}\right|$가 충분히 작을 때, 즉 마운트의 등가 강성에 비해 바닥 받침대의 임피던스가 충분히 클 때 우변의 $\left|1+\frac{k}{Z_f j\omega}\right|$ 항이 거의 1이 되기 때문에 장비 받침대 임피던스가 바닥 진동 전달률에 큰 영향을 미치지 않게 된다. 또한 식 (10)에서 진동 전달률을 장비 받침대의 동적 강성 항으로 표현할 경우 $\left|\frac{k}{K_f}\right|$가 충분히 작을 때, 즉 마운트의 등가 강성에 비해 바닥 받침대의 동적 강성이 충분히 클 때 우변의 $\left|1+\frac{k}{K_f}\right|$ 항이 거의 1이 되기 때문에 장비 받침대 강성이 바닥 진동 전달률에 큰 영향을 미치지 않게 된다. 물론 받침대의 임피던스 또는 동적 강성을 무한대로 두면 좋겠지만 이는 물리적으로 불가능하기 때문에 적정 수준에서 바닥 임피던스 레벨을 관리해야만 한다.

본 논문에서는 이러한 적정 수준에 대해 바닥으로 전달되는 마운트 하단의 진동(바닥 받침대의 변위)이 마운트 상단 진동(장비의 변위)의 10% 미만이 되도록 그 기준을 설정하고자 한다. 식 (6)~(7)에서 감쇠계수를 무시할 경우 변위 전달률은 식 (11)과 같으며, 식 (11)로부터 바닥 받침대의 임피던스 레벨에 따른 변위 전달률을 계산해 보면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{X_f}{X}=\frac{1}{1+\frac{Z_f j\omega}{k}} \quad (11)$$

Fig. 2의 계산 결과로부터 바닥 받침대의 동적 강성이 마운트의 강성에 비해 10배 이상 될 경우 ($Z_f j\omega = K_f > 10k$) 변위 전달률은 10% 미만이 됨을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 바닥 받침대의 임피던스 및 동적 강성에 대한 기준을 식 (12)와 같이 탑재 장비의 바닥 또는 받침대의 동적 강성이 마운트 총 등가 강성의 10배 이상이라는 조건($\left|\frac{k}{Zj\omega}\right|<0.1$)으로 바닥 받침대의 임피던스의 기준을 설정하고 이에 대한 관리의 필요성을 다루고자 한다.

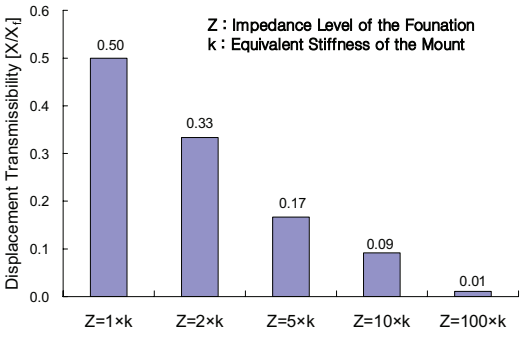


Fig. 2 Displacement transmissibility according to the impedance level of the foundation

$$20\log\left|\frac{k}{Z_f j\omega}\right|<-20 \quad (12)$$

$$20\log|Z_f|>20+20\log|k|-20\log(2\pi f)$$

3. 장비 마운트의 동적 강성

일반적으로 장비 마운트의 경우 충격 및 진동 절연을 위해 고무재질을 많이 사용하고 있다. 이러한 고무 재질의 경우 점성과 탄성을 동시에 가진 재료로 충격 및 진동 절연재료 널리 사용되고 있다. 고무 마운트를 사용할 경우 고무 재질의 비선형적 특성 때문에 전절의 식 (12)에서 고무 마운트의 강성은 온도, 주파수 및 초기 자중에 의한 압축량 등에 따라 달라지므로 이러한 고무의 동적 특성을 추출하기 위한 연구들이 지속적으로 진행되고 있다[6-7]. 본 절에서는 함정에서 사용하고 있는 마운트에 대해서 온도와 초기 압축량을 고정시켜 놓은 상태에서 주파수에 따른 고무 마운트 강성의 변화를 측정하고자 하며, 장비의 바닥 받침대의 임피던스를 규제할 때 이를 기본 자료로 활용하고자 한다.

3.1 측정 장비 및 절차

장비 마운트의 정적인 특성과 동적인 특성은 차이가 나기 때문에 단순히 정적 하중 시험을 통해 측정된 강성만으로 마운트의 특성을 파악할 수 없다. 따라서 KS M 6604[8]에서는 마운트에 사용되는 고무 재료의 동적 특성을 공진법과 비공진법으로 측정하도록 권장하고 있다. 하지만 공진법의 경우 공진 주파수에서의 동적 강성 및 손실 계수(Loss factor)만 추출이 가능하기 때문에 마운트의 전 주파수 범위에서의 특성을 알 수 없다. 주파수에 따른 바닥 받침대의 임피던스 하한값을 규제하기 위해서는 관심 주파수 범위에서 마운트의 동적 강성을 알아야 하기 때문에 본 연구에서는 비공진법을 이용하여 마운트의 동적 특성을 파악하였다. 동적 특성을 파악하기 위한 마운트는 현재 해군에서 사용하고 있는 마운트로 미국 Bary Controls 사에서 제작한 제품이며 이의 주요 제원은 Table 1에 나타내었다.

비공진법으로 이들 마운트의 동적 특성을 파악하기 위해서 Fig. 3과 같이 지그를 구성하고 두 개의 가속도계(Endevco model 27AM1-10)를 각각 마운트 상부 및 하부에 장착하여 측정된 가속도 값을 시간에 대해 두 번 적분하여 변위를 구하였다. 또한 각 시험 주파수에서 가진력을 일정하게 가해지도록 모니터링하기 위해서 가진기와 마운트 사이에 가진력 센서(Force transducer)를 설치하였다. 가진기는 LING사의 LMT-100을 사용하였으며 20Hz~1kHz 구간의 1/3 옥타브의 중심주파수에서 동일한 수직력(20N)으로 사인(Sine)파로 가진하였다.

KS M 6604에 따라 마운트의 동적 강성 및 손실 계수는 Fig. 4에 나타낸 힘-하중 이력 곡선 계측 결과로부터 식 (13)~(15)와 같이 구할 수 있다.

$$|k^*| = P_0/x_0 \tag{13}$$

$$\sin\delta = (2/\pi)(\Delta W/W) \tag{14}$$

$$k_1 = |k^*|\cos\delta,\ k_2 = |k^*|\sin\delta,\ l = k_2/k_1 = \tan\delta \tag{15}$$

Table 1 Types of the mounts for testing

Types	6E150	7E450
Material of Rubber	CR(Neoprene)	CR(Neoprene)
Hardness, Shore"A"	45	45
Load capacity(N)	445~667	445~2002

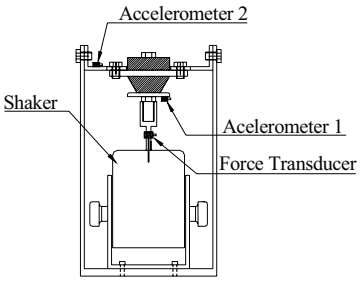


Fig. 3 Test jig for measuring dynamic stiffness of the rubber mount

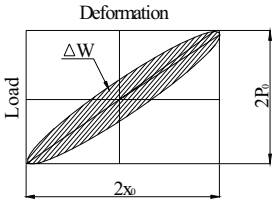
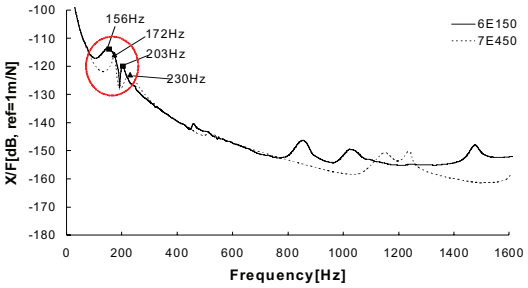


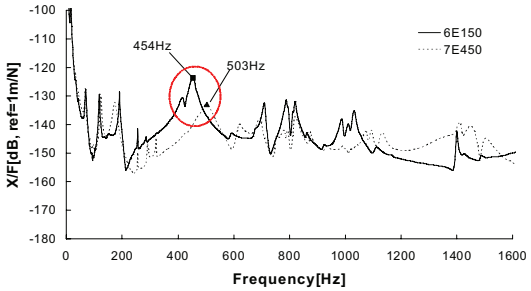
Fig. 4 Load-deformation curve for the rubber mount

여기서 k^*는 복소 스프링 상수, k_1은 저장 스프링 상수, k_2는 손실 스프링 상수, l은 손실 계수, P_0는 하중 진폭(=20N), x_0는 변형 진폭, W는 장방향 면적($2x_0 \times 2P_0$), ΔW는 하중-변형 곡선에 둘러싸인 부분의 면적이다.

측정 시 지그의 공진이 측정에 미치는 영향을 피하기 위해서, 동적 강성 측정에 앞서 지그의 모달 시험을 통해 고유 진동수를 파악하고 변위 대 입력의 전달함수 레벨이 큰 고유 주파수 근방의 주파수는 시험에서 제외시켰다. Fig. 5는 측정 지그의 모달 시험 결과이다. Fig. 5(a)에서와 같이 마운트 임팩트에 대한 응답 특성 분석 결과 마운트-가진기 계가 6E150의 경우 156Hz 및 203Hz에 전달함수 레벨이 큰 고유주파수가 존재함을 알 수 있었으며 7E450의 경우 172Hz, 230Hz에 전달함수 레벨이 큰 고유 주파수를 가지고 있음을 알 수 있었다. 따라서 이 주파수 근방에서는 계의 공진이 마운트의 응답특성에 영향을 미칠 것으로 판단되어 6E150의 경우 125, 160, 200Hz, 7E450의 경우 160, 250Hz를 가진 주파수에서 제외시켰다. 또한 측정 지그 자체가 고유주파수에서 공진을 일으킬 경우 지그의 진동으로 인해 측정된 변위의 신뢰성이 떨어지게 된다. 따라서 Fig. 5(b)와 같이 지그 자체의 모달 시험을 통해 지그의 고유진동수를 파악해본 결과, 6E150이 조립된 경우 454Hz, 7E450이 조립된 경우 503Hz의 고유주파수에서 큰 전달함수 레벨을 가지기 때문에 6E150



(a) Mount impact/mount response



(b) Jig impact/jig response

Fig. 5 FRF curve of the test jig and mount assembly

의 경우 400Hz, 7E450의 경우 500Hz를 가진 주파수에서 제외시켰다.

3.2 측정 결과

7E450 마운트에 대해 전절의 Fig. 4와 같이 특정 주파수(125Hz. 500Hz)에 대해 하중-변위선도를 그려보면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 가진력이 일정할 경우 가진 주파수가 증가하면 강성 증가로 인해 변위가 감소하게 되므로 감쇠가 증가함을 알 수 있다.

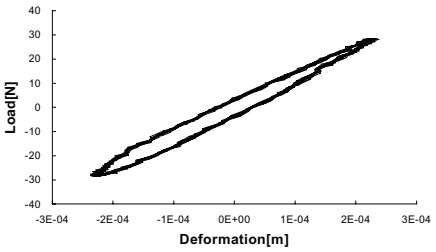
이러한 하중-변위 선도와 전절의 식 (13)~(15)를 가지고 마운트의 복소 강성과 손실 계수를 구해보면 Fig. 7 및 8과 같다.

Fig. 7에서 6E150 및 7E450 모두 100Hz 까지는 마운트의 강성이 일정하지만 그 이상의 주파수에서는 주파수 증가에 따라 복소 강성과 손실 계수가 증가하는 지수 함수 분포를 가짐을 알 수 있었다.

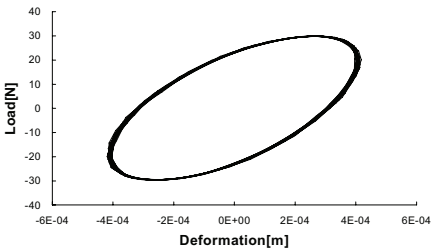
측정된 데이터에 대해서 회귀분석 결과 20Hz~1kHz 주파수 범위에서 마운트의 동적 복소 강성은 각각 식 (16) 및 (17)과 같음을 알 수 있었다.

$$|k^*(f)|_{6E150} = 1.397\times10^5 e^{0.0041f} \quad [N/m] \qquad (16)$$

$$|k^*(f)|_{7E450} = 3.075\times10^5 e^{0.0031f} \quad [N/m] \qquad (17)$$



(a) 125Hz



(b) 500Hz

Fig. 6 Load-deformation curve of the 6E150 mount according to the frequency

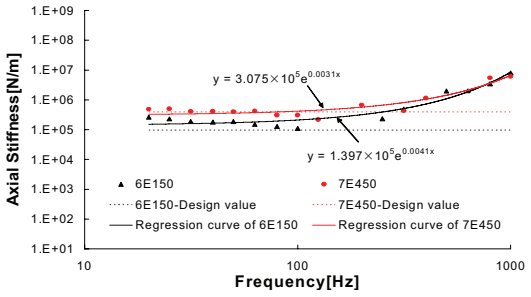


Fig. 7 Dynamic stiffness(k*) of the rubber mount according to the frequency

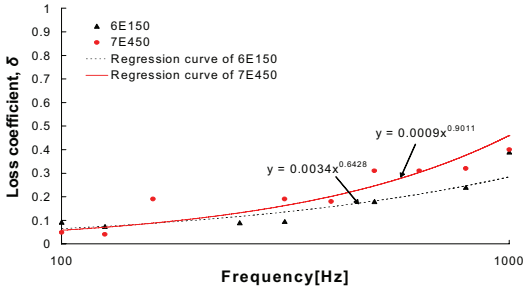


Fig. 8 Loss factor of the rubber mount according to the frequency

여기서 f는 주파수, $k^*(f)$는 마운트의 동적 복소 강성이다.

Fig. 8에 나타낸 손실 계수의 경우 100Hz 미만의 주파수에서 가속도 데이터에 가진 주파수의 조화성분들이 많이 발생하여 하중-변형 곡선에 둘러싸인 면적을 구하기가 쉽지 않아 관심 주파수에서 제외시켰다. Fig. 8에서 손실 계수 역시 100Hz~1kHz 범위 내에서 주파수가 증가함에 따라 거듭 제곱 함수의 형태로 증가함을 알 수 있었으며, 회귀분석 결과 식 (18) 및 (19)과 같음을 알 수 있었다.

$$\delta(f)_{6E150} = 0.0034 f^{0.6928} \tag{18}$$

$$\delta(f)_{7E450} = 0.0009 f^{0.9011} \tag{19}$$

여기서 $\delta(f)$는 동적 감쇠 계수(Damping factor)이다

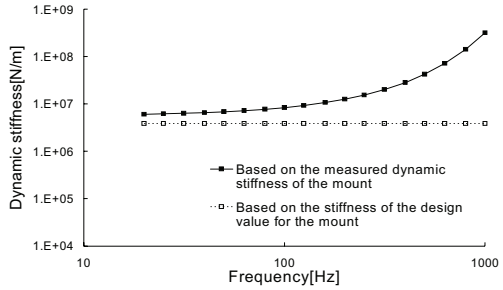
이와 같이 마운트의 스프링 상수 및 손실 계수의 동적 특성을 파악함으로써 주파수에 따른 장비의 받침대 강성 및 임피던스의 동적 특성을 규제하기 위한 기본 데이터를 얻을 수 있었다.

4. 바닥 강성 및 임피던스 규제 제안

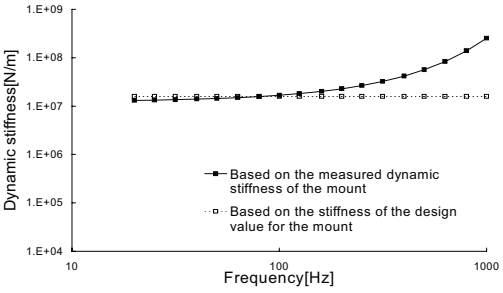
3.1절의 마운트 동적 복소 강성과 손실 계수를 가지고 저장 탄성 계수를 식 (14)를 통해 계산하고 마운트가 병렬로 총 4개가 적용되었을 경우에 대해 식 (11)로부터 주파수에 따른 바닥 받침대의 동적 강성과 임피던스의 하한치를 계산한 결과를 Fig. 9 와 10에 나타내었다. Fig. 9 및 10에서 6E150 및 7E450의 원제작사가 표기한 강성(Design value)을 기준으로 한 바닥 받침대의 강성과 임피던스에 비해 동적 강성을 적용할 경우 바닥 받침대의 동적 강성 및 임피던스의 하한 레벨이 고주파로 갈수록 증가해야 함을 알 수 있다.

결과로부터 고무마운트의 제작사에서 제시하는 강성만으로는 주파수 의존도를 알 수 없기 때문에 이를 가지고 바닥 받침대의 강성 또는 임피던스를 규제할 경우 고주파로 갈수록 규제가 완화되게 된다. 따라서 장비에 사용되는 마운트에 대한 동적 강성을 파악하여 이를 가지고 바닥 받침대의 강성 및 임피던스를 규제하는 것이 바람직하다.

5. 결 론

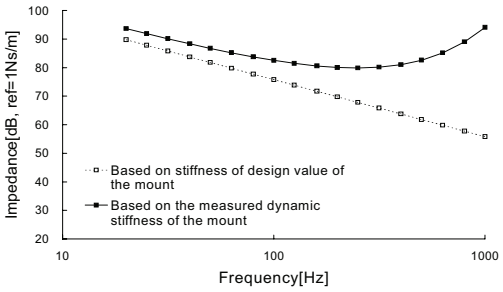


(a) 6E150

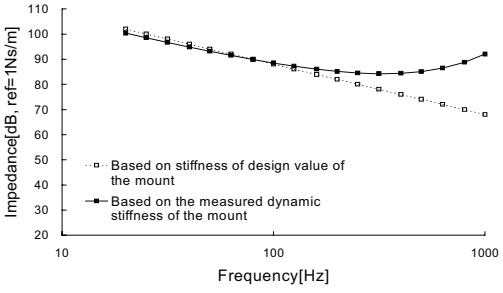


(b) 7E450

Fig. 9 Proposed minimum stiffness level for the foundation of 6E150 and 7E450 mount



(a) 6E150



(b) 7E450

Fig. 10 Proposed minimum impedance level for the foundation of 6E150 and 7E450 mount

장비의 마운트가 성능을 제대로 발휘하기 위해서는 이를 지지하는 받침대 또는 바닥의 강성이 충분히 커야 한다.

본 논문에서는 이러한 받침대 및 선체의 강성을 이들 위에 설치되는 고무 마운트의 동적 강성 측정을 통해 마운트의 동적 강성을 기준으로 이의 10배 이상을 가지도록 제안하였으며 이는 시스템을 단순 질량-스프링계로 가정하였을 때 변위 전달률이 10% 미만이 되는 조건이다.

특히 고무 마운트의 동적 강성은 함정에서 사용하고 있는 규격품 마운트(6E150, 7E450)의 실험을 통해 고무의 손실 계수 및 동적 강성의 주파수 의존도를 파악하고 회귀 분석을 통해 주파수와 손실 계수 및 동적 강성과의 상관식을 제안하였다.

본 논문의 실험에서 가진기의 가진력이 충분히 크지 않아 1kHz 이상에서의 동적 강성을 추출하지 못했다.

함정의 경우 바닥 및 선체 진동이 수중 방사 소음 레벨을 증가시키기 때문에 소음 관점에서 장비의 바닥 받침대 임피던스를 규제하고 있다. 따라서 보다 고주파 영역에서 마운트의 동적 강성을 추출하여 고주파수 영역에서의 임피던스 하한치를 제안하여야만 한다.

본 연구에서는 이러한 요구 조건에 대해 고주파 영역까지 바닥 받침대의 임피던스를 제안하지는 못하였지만 이들을 규제하는 방법을 제시함으로써 향후 추가적인 연구에 도움이 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

(1) MIL-STD-740-2, 1986, "Structure Borne Vibratory Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment".

(2) MIL-STD-167-1A, 2005, "Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment(Type Ⅰ- Environmental And Type Ⅱ-Internally Excited)".

(3) MIL-STD-17185A, 1956, "Mount, Resilient; General Specifications and Tests for Shipboard Application".

(4) Arai Hiroki, Awa Keizo and Shiraki Kazuhiro, 2000, "Measuring of Mechanical Impedance of Support Points of Large Engine", Dynamics & Design Conference, pp.664-668.

(5) Kim., H. S., Kim., J. S., Kang., H. J., Kim., B. K., and Kim., S. R., 2007, "SBN(Structure-borne Noise) Reduction of Resilient Mounted Machinary and Effect of Foundation Impedance", Spring Conference of KSNVE, E07S-14-04.

(6) Kim., K. W., Lim., J. R., Son, H. G. and Ahn, T. K., 1999, "Static Deformation Analysis and Dynamic Characteristics Prediction of Compressed Rubber Material", KSNVE, Vol.9, No.3, pp.472-476.

(7) Danilo Cambiaghi, Andrea Magalini, Giorgio Ramorino, Theonis Ricco and David Vetturi, 2006, "High Frequency Dynamic Testing of Rubbers and Rubber to Metal Devices", Journal of Testing and Evaluation, Vol.34, No.3,pp.211-217.

(8) KS M 6604, 2006, "Testing Method for Rubber Vibration Isolator".