

마운트의 음향강성 측정을 위한 시험장치 개발

배수룡, 정우진*, 함일배*, 김두기*, 이현곤*

(A Development of the Test Equipment to Measure the Acoustic Stiffness of Resilient Mounts)

(Soo-Ryong Bae, Woo-Jin Jung, Il-Bae Ham, Du-Ki Kim, Hun-Gon Lee)

1. 서 론

합정에 탑재된 각종 기계류로부터 발생하는 진동과 소음은 선체를 통하여 수중방사소음으로 전파된다. 이때 기계류에 마운트를 설치하는 것은 매우 효과적인 소음감소 대책으로 알려져 있다.

마운트의 강성계수는 주파수 대역에 따라 정적 강성계수(static stiffness, 1~2Hz), 동적 강성계수(dynamic stiffness, 2~20 또는 50 Hz), 음향 강성계수(acoustic stiffness, 20Hz~20kHz)로 나눌 수 있다⁽¹⁾. 대부분의 경우 하중-변위 곡선으로부터 구하는 정적 강성계수나 고유진동수로부터 계산되는 동적 강성계수를 이용하여 마운트가 전달하는 음향에너지 크기를 계산하고 있으나, 실제로는 전주파수 대역(특히 음향 주파수 대역)에서 마운트의 실제 강성계수는 동적 강성계수와 비교하여 큰 차이가 있다.

탑재 기계류에 의한 수중방사소음의 감소를 위한 최적화된 마운트 시스템의 설계와 수중방사소음의 정확한 예측을 위하여 선진각국에서는 마운트의 음향 강성계수를 실험적으로 구하여 사용하고 있으나⁽²⁾⁽³⁾, 국내의 경우 그렇지 못한 실정이다. 이에 따라 음향강성을 실험적으로 측정하기 위한 시험장치를 개발하게 되었다.

본 논문에서는 마운트의 음향 강성계수를 실험적으로 구하기 위한 이론적 배경을 설명하고, 개발된 시험장치⁽⁴⁾를 소개하였으며, 시험장치를 이용하여 구한 마운트의 음향 강성계수 측정결과를 수록하였다.

2. 이론적 배경

2.1 마운트의 임피던스

마운트의 양단에서 6자유도로 나타내는 일반적인 경우에 대하여, 마운트의 특성은 선형적인 12개의 항으로 나타낼 수 있다.

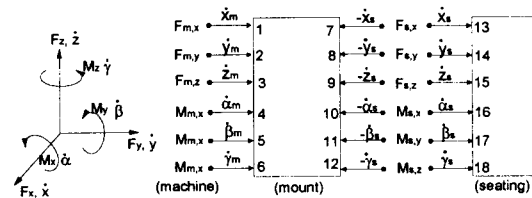


Fig. 1 Cartesian coordinate system and mechanical 12-port representing the resilient mount

Fig. 1에서 병진방향 속도는 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$, 회전방향 속도는 $\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}$, 병진방향 힘은 F_x, F_y, F_z , 회전방향 모멘트는 M_x, M_y, M_z 으로 표시하였다. 그리고, 하첨자 'm'은 기계를 나타내며, 하첨자 's'는 시팅(seating)을 나타낸다. Fig. 1의 단일 마운트에 대한 임피던스 방정식은 다음과 같다.

$$\{F\} = [Z]\{V\} \quad (1)$$

여기서, $\{F\} = \{F_{m,x} \ F_{m,y} \ \dots \ M_{s,z}\}^T$

$$\{V\} = \{\dot{x}_m \ \dot{y}_m \ \dots \ \dot{\gamma}_s\}^T$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{12 \times 12}$$

이며, 상첨자 T는 전치행렬을 의미한다.

행렬 [Z]에서 가역성의 원리로 $Z_{i,j} = Z_{j,i}$ 이며

* 국방과학연구소(ADD)

$Z_{i,j} = F_i / v_j$ 이다. 시팅에서의 힘과 모멘트는 행렬 C 에 의하여 결정된다⁽¹⁾⁽²⁾.

$$\{F_s\} = [C]\{V_m\} \quad (2)$$

여기서, $\{F_s\} = [F_{s,x} \ F_{s,y} \ F_{s,z} \ M_{s,x} \ M_{s,y} \ M_{s,z}]^T$

$$\{V_m\} = [\dot{x}_m \ \dot{y}_m \ \dot{z}_m \ \dot{\alpha}_m \ \dot{\beta}_m \ \dot{\gamma}_m]^T$$

2.2 마운트의 음향강성

마운트의 차단 전달임피던스는 다음과 같이 정의된다.

$$Z_{i,j} = \frac{F_{s,i}}{v_{m,j}} \mid \text{all other } v_{m,i} = 0, \quad k \neq j \quad (3)$$

마운트의 시험을 할 때, 만약 $|Z_{i,j} \cdot v_{m,j}|$ 가 다른 항을 합한 값 보다 매우 크면 속도가 0 이라는 조건을 충분히 만족한다. 마운트의 차단 전달함수 (structureborne blocked transfer function)는 가속도 향으로 다음과 같이 정의한다.

$$T_{i,j} = \frac{F_{s,i}}{a_{m,j}} \mid \text{all other } a_{m,i} = 0, \quad k \neq j \quad (4)$$

강성계수와 임피던스의 관계는 다음과 같다.

$$T_{i,j} = \frac{F_i}{a_j} = \frac{Z_{i,j}}{j\omega} = -\frac{k_{i,j}}{\omega^2} = -\frac{k(1+j\eta)}{\omega^2} \quad (5)$$

여기서, $j = \sqrt{-1}$, ω 는 각주파수(rad/s), k 는 마운트의 복소 음향 강성계수를 나타내며 η 는 마운트의 손실계수(loss factor)이다. 식(5)로부터 차단 전달함수를 측정하면 마운트의 음향 강성계수를 구할 수 있음을 알 수 있다.

3. 차단 전달함수 측정

3.1 차단 전달함수의 측정 원리

식(1)에 나타난 행렬 A 에 비하여 상대적으로 높은 구동점 임피던스를 가지는 블록(excitation block)을 가진시키고(이 블록은 가진방향의 자유도 외의 모든 운동을 차단하여야 함), 행렬 D 의 구동점 임피던스 보다 높은 임피던스를 가지는 시팅블록의 가속도의 향에 의하여 결정되는 차단힘(blocked force)의 측정을 통하여 시험용 마운트의 차단 전달함수를 구하는 개념이 Fig. 2에 나타나 있다.

시험 대상 마운트는 두 개의 블록 사이에 위치하며, 블록은 강제운동을 한다. 그리고, 가진블록(excitation block) 위에 설치되는 보조 마운트는

시험용 마운트에 정하중(static preload)을 가하기 위한 것이며, 시팅블록(seating block)을 지지하기 위하여 보조 마운트가 시팅블록 아래에 설치된다.

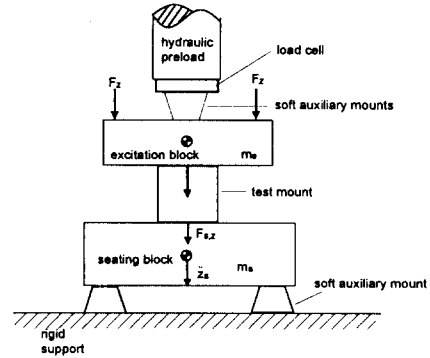


Fig. 2 Concept for measuring structureborne sound transfer properties of mounts

3.2 수직방향 차단 전달함수 측정

수직방향 전달함수를 측정하고자 할 경우에는 시팅블록을 지지하는 보조 마운트의 강성계수가 시험 대상 마운트의 강성계수보다 훨씬 작다는 가정에서부터 출발한다. Fig. 2에서 보는바와 같이 가속도비 \dot{z}_s / \dot{z}_m 를 가속도 전달율(acceleration transmissibility)이라고 하며 T_a 로 정의한다. 적절한 크기의 m_s 를 이용하면 상당히 넓은 주파수 대역에서 마운트의 차단 전달함수를 구할 수 있다.

$$T_{F_i, z'} = \frac{F_{s,z}}{z_m} \cong m_s T_a = m_s \frac{\dot{z}_s}{\dot{z}_m} \quad (6)$$

2 자유도계 모델링으로부터 식(6)의 가속도 전달율에 의한 차단 전달함수와 식(5)의 차단 전달함수의 비는 식(7)로 나타난다.

$$20 \log \left| \frac{m_s T_a}{T_{F_i, z'}} \right| = 20 \log \frac{\Omega^2}{[(1 - \Omega^2)^2 + \eta^2]^{1/2}} \quad (7)$$

여기서, $\Omega^2 = \frac{\omega^2}{\omega_0^2}$, $\omega_0^2 = k/m_s$ 이다.

일반적인 마운트가 $\eta = 0.1$ 이므로, 마운트 고유진동수의 3배 이상의 주파수에서 식(7)은 1.02dB 이하이며, 위상차 $\phi_{T_a} - \phi_{T_{F_i, z'}}$ 는 0.71° 이하로 오차가 거의 없다. 즉, 음향 강성계수를 구할 때 간략화된 식(6)의 가속도 전달율을 이용한 차단 전달함수를 사용하여도 큰 오차가 없음을 알 수 있다.

3.3 수평방향 차단 전달함수 측정

수직방향 전달함수 측정시와 같은 절차를 적용할 수 있으나 회전 모멘트가 발생할 수 있다는 것이 수직방향 가진의 경우와 다른 점이다. 따라서 회전 모멘트의 발생을 최소화하기 위하여 상부 블록과 마운트의 상부 플랜지까지 고려할 경우의 질량 중심에 수평방향 가진력이 작용되어야 한다.

3.4 회전방향 차단 전달함수 측정

회전방향과 관련된 측정시에는 Fig. 3과 같은 방식을 이용하는데 이때 시험 대상 마운트의 상부 플랜지에서 수평방향 성분이 발생하지 않도록 하고, 시험 대상 마운트의 하부 플랜지에서 발생하는 차단 모멘트를 측정하여야 한다. 마운트 상단의 회전변위 $\ddot{\beta}_m$ 에 의한 차단 모멘트 $M_{s,y}$ 사이의 $\mathcal{T}_{M_s, \beta}$ ($= M_{s,y} / \ddot{\beta}_m$)를 측정하는 경우, 시험 대상 마운트의 하단에서 발생하는 차단 모멘트 $M_{s,y}$ 는 다음과 같은 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$M_{s,y} = J_{s,y} \ddot{\beta}_s - m_s \ddot{x}_s \cdot (h/2) \quad (8)$$

이때 \ddot{x}_s 는 시팅블록의 질량중심의 가속도, $J_{s,y}$ 는 시팅블록의 y축에 대한 극관성 모멘트이며, h 는 높이이다. 식(8)에서 $\ddot{\beta}_s$ 와 \ddot{x}_s 는 측정값들이므로 식(8)을 이용하면 $M_{s,y}$ 를 측정할 수 있다. 따라서 측정데이터와 식(8)을 이용하여 차단 전달함수 $\mathcal{T}_{M_s, \beta}$ 를 구할 수 있다. 측정된 결과는 Fig. 4와 같이 상반정리를 이용하면 회전변위 가진에 의해서 측정한 전달함수들의 정확성 및 유용성 등을 확인할 수 있다.⁽²⁾

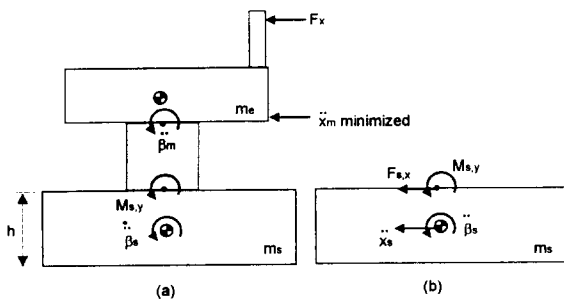


Fig. 3 Rotational excitation and measurement of blocked moment.

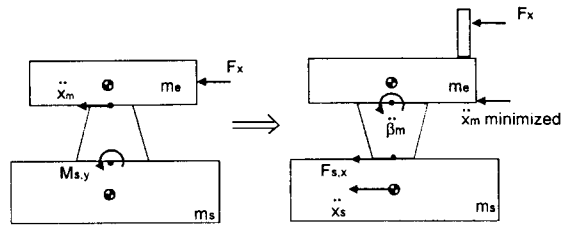


Fig. 4 Reciprocal principle: $\mathcal{T}_{M_s, \ddot{x}}$ equals

$$\mathcal{T}_{F_s, \beta}$$
 for the mount inverted.

4. 음향강성 측정을 위한 마운트 특성 시험장치

4.1 시험장치 일반

마운트의 음향강성 측정을 위하여 개발된 마운트 특성 시험장치의 전체 전경은 Fig. 5와 같으며 이를 도식화하면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 시험장치는 크게, 가진블록과 시팅블록, 가진블록을 가진할 가진기, 시험용 마운트에 정하중을 가하는 유압실린더, 정하중을 측정하는 로드셀, 가속도 계측시스템 등으로 구성되며 개발된 시험장치의 사양은 다음과 같다.

- 체원 : 2200 x 1800 x 1310 mm(WxDxH)
- 측정 가능 주파수 : 20Hz~2kHz
- 가진력(112 Newton x 2 EA)
- 정하중 : 100 ton 까지 가능
- 가진 방향(병진 3방향, 회전 3방향)

시험장치는 100톤의 정하중에 견딜 수 있게 구조해석과 강도계산을 통한 설계가 수행되었으며 100톤의 하중을 가하여 시험장치의 안전성을 시험하였다.

4.2 시험장치의 모드해석

시험장치의 자체 진동이 미치는 영향을 파악하기 위하여 시험장치의 모드해석 실험을 수행하였다. 모드해석을 위한 모델은 Fig. 7에 나타나 있으며, 모드해석의 결과인 고유진동수와 모드맵핑이 Table 1에, 1차 고유모드의 모드형상이 Fig. 8에 나타나 있다. Table 1에서 100Hz 이하에 고유진동수가 많이 분포하고 있음을 알 수 있으나 이는 시험장치의 크기 문제에 기인하고 마운트에 비하여 시험장치의 임피던스가 높으므로 큰 문제가 되지 않을 것으로 생각된다.

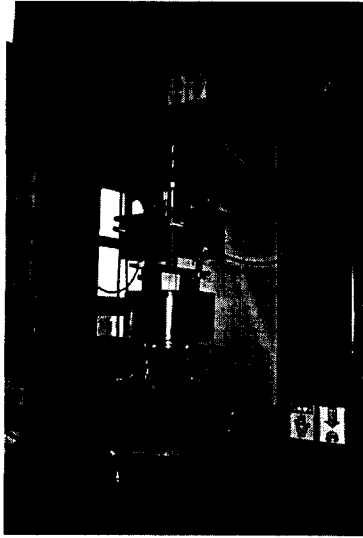


Fig. 5 Photograph of the test equipment for measuring mount properties

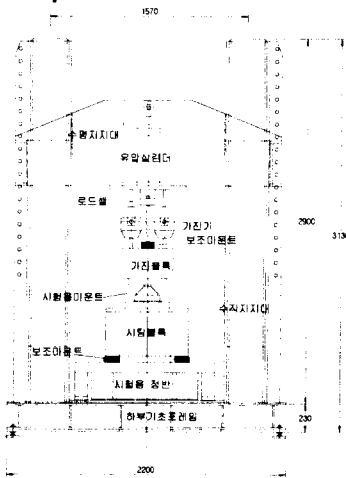


Fig. 6 Schematic of the test equipment



Fig. 7 The modal model of the test equipment

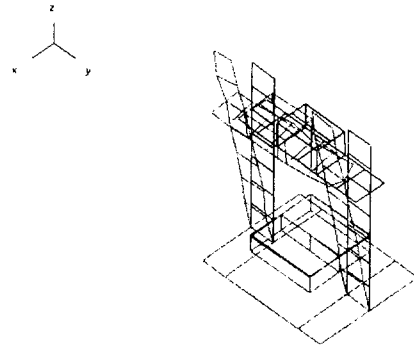


Fig. 8 The 1st mode shape of the test equipment

Table 1 The natural frequencies and modal dampings of the test equipment

모드 번호	(수직+수평)지지대 +시험용 정반		하부기초프레임	
	frequency (Hz)	damping (%)	frequency (Hz)	damping (%)
1	11.5	9.47	-	-
2	15.6	8.79	-	-
3	29.6	3.92	29.3	3.72
4	36.5	5.86	36.0	5.82
5	51.7	3.37	51.3	3.36
6	61.5	2.96	60.8	2.88
7	67.4	2.01	-	-
8	74.1	2.02	73.9	3.04
9	97.7	1.39	-	-
10	103.3	1.66	104.6	1.48
11	111.4	1.07	116.5	2.05

5. 마운트 특성 시험 및 고찰

Fig. 9와 같이 가진블록과 시팅블록 사이에 시험용 마운트를 설치하고, 가진블록에 두 개의 가진기를 설치한 후 동시에 가진을 하였다. 가진블록과 시팅블록에 가속도계(B&K 4370, acc1-acc6)를 설치한 후 가속도 전달함수를 구하였다. 이 때 사용된 시험용 마운트는 Vibrachoc사의 E1N106C60 이며, 보조 마운트의 제원은 다음과 같다.

- 상하부 보조 마운트(고무재질)
 - 제원 : ϕ 80 x L 100 mm
 - 동적 강성계수(k_d) : 1.76×10^6 N/m
 - 수량 : 상부 2EA, 하부 4EA

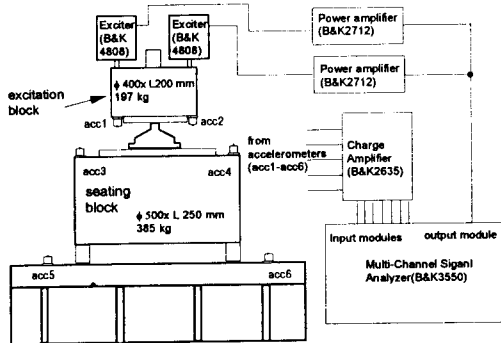


Fig. 9 Schematic of experimental setup

시험용 마운트의 정적 강성계수는 다이얼 게이지를 이용한 처짐 측정과 로드셀에서 측정한 정하중으로부터 $k_{stat} = 4.64 \text{ MN/m} (=933 \text{ kgf}/1.97 \text{ mm})$ 로 추정되었다.

Fig. 10에는 정하중의 변화에 의한 시험용 마운트의 전달함수 ($L_i = 20 \log |T_{i,j}|$) 변화를 보여주고 있다. 그림에서 정재파(standing wave)의 영향이 나타나지 않는 구역은 순수한 스프링($k=1.2 \text{ MN/m}$)의 전달함수 (a)와 거의 같다. 또한 이 그림으로부터 1000Hz 이상에서 정재파의 영향이 나타나고 있으며, 정하중이 작아지면 정재파가 발생하는 주파수가 낮은 쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 80Hz 이하에서는 보조 마운트의 영향과 가진기로부터 전달되어온 시험용 정반의

진동의 영향(flanking path), 시험장치의 고유진동 모드에 의한 영향 등이 나타나고 있음을 알 수 있다.

80Hz 이하의 주파수의 측정결과를 신뢰하기 위해서는 보다 부드러운 보조 마운트를 사용하면 측정 요구 주파수 20Hz 까지 측정 가능할 것으로 판단된다. 또한 측정 가능 주파수를 넓히기 위하여 가진기로부터 전달되어오는 진동의 감소, 마운트를 블록에 결합하기 위한 치구의 임피던스를 크게 하여야 한다. 그러나, 보통의 경우 80Hz 이하의 신뢰할 만한 측정결과를 얻기는 상당히 어려우나 순수한 스프링의 효과가 나타나는 구역(전달함수의 기울기가 일정함)으로부터의 외삽(extrapolation)을 이용하면 20~30Hz까지의 전달함수를 유추할 수 있다⁽²⁾.

Fig. 11에서 왼쪽의 종축은 측정된 차단 전달함수, 오른쪽의 종축은 차단 전달함수로부터 계산한 수직방향 음향 강성계수를 나타내고 있다. 측정결과를 신뢰할 수 있는 주파수인 100Hz 이상을 보면 정재파의 영향으로 인한 마운트 내부의 공진으로 강성계수는 주파수에 따라 30dB의 차이가 발생함을 알 수 있다.

마운트 제작사의 데이터와 측정결과로부터 구한 강성계수들을 정리하면 Table 2와 같으며, 정적 강성계수와 음향 강성계수는 약 2.5배의 차이가 있음을 알 수 있으며 이 비는 다른 측정결과^{(5),(6)}와 비교하여 비슷하다.

Table 2 Stiffnesses

	Data by manufacturer		Measured data	
	Stiffness	Load range	Stiffness	Preload
	10^6 N/m	N	10^6 N/m	N
Static stiffness	0.773	7000 ~ 10000	4.46	9149
Dynamic stiffness	0.987 ~ 1.35	-	-	-
Acoustic stiffness	-	-	12.0	9198

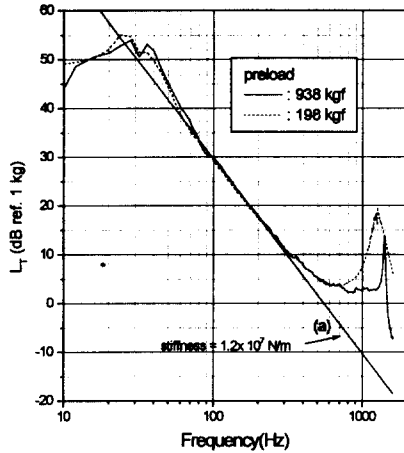


Fig. 10 Transfer function $T_{F, z}$ of the Vibrachoc E1N106C60 mount

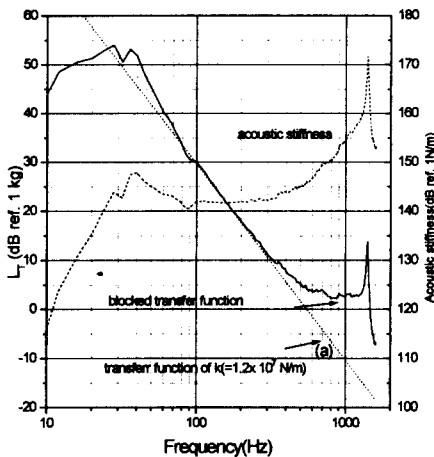


Fig. 11 Vertical acoustic Stiffness of the Vibrachoc E1N106C60 mount

6. 결 론

진동/소음의 중요한 차단수단인 마운트의 음향 강성계수는 마운트 제작사 들이 제공하지 않는 데이터로서 합정의 구조전달소음 및 방사소음을 정도 높게 예측하는 데는 필수적인 자료들이다. 음향 강성계수는 이론적으로 구하는 것은 거의 불가능하므로 이를 실험적으로 구해야 한다. 이를 위하여

마운트 특성 시험장치를 제작하였으며, 확보된 마운트 특성 시험장치에 대한 진동모드 해석 및 수직방향에 대한 마운트의 전달함수 측정으로부터 음향강성을 구하여 마운트 특성 시험장치의 이용 가능성을 확인하였다. 본 마운트 특성 시험장치를 이용하면 마운트 제작사가 제공하는 마운트의 정적 강성계수와 동적 강성계수 이외에 실제로 진동 차단 해석에 필요한 데이터인 마운트의 음향 강성계수 값을 얻을 수 있고 진동차단 해석이나 방사소음 해석의 정도를 높일 수 있다.

참고문헌

1. ISVR Lecture notes, "Noise Reduction of Machinery Installations by Vibration Isolation"
2. J. W. Verheij, 1986, "Multi-path sound transfer from resiliently mounted shipboard machinery", TNO-TPD
3. J. W. Verheij, 1980, "Measuring sound transfer through resilient mountings for separate excitation with orthogonal translations and rotations", INTER-NOISE 80
4. 정우진, 배수룡, 함일배, 1998, "마운트 특성 시험장치 개발결과 및 활용방안 연구", 국방과학연구소 보고서 NWS-513-980339
5. B. van der Graaf, 1983, "Structure-borne sound transfer functions of a flexible mounting for the s-frigates DG-set", NTIS N83-34384/8/HDM
6. B. van der Graaf, 1984, "Structure-borne sound transfer functions of a Dunlop Super 'D' flexible mounting", NTIS N84-27552/8/HDM