



특집1

회전기계의 저소음·저진동

합정용 장비의 공기음 및 고체음저감

김 현 실*

(한국기계연구원)

1. 머리말

일반 상선이나 합정 등에는 디젤엔진, 펌프류 등 자체 구동력을 갖는 많은 장비가 설치되어 있으며 이로 부터 발생하는 소음·진동은 승선감을 떨어뜨리고 근무조건을 열악하게 만든다. 상선이나 여객선의 경우 승조원이나 탑승객의 안락함이 우선시되며 최종적으로는 격실에 대한 소음레벨이 목표치가 되므로 개별장비에 대해서는 특별히 소음·진동의 허용치는 없다. 그러나 합정에서는 개별장비에 대한 소음·진동(또는 공기음/고체음) 레벨의 허용치⁽¹⁻³⁾가 있으며 이를 엄격히 규제하고 있다. 따라서 같은 성능을 갖는 펌프라 할지라도 합정에 납품되는 펌프는 허용치를 만족하기 위해 소음·진동의 감소에 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다.

공기음(airborne noise)은 장비에서 직접 발생하며 장비가 설치된 공간에 소음을 발생시킨다. 장비가 설치되는 격실의 종류에 따라 소음레벨의 규제치가 달라지며 음향과외⁽⁴⁾ 또는 장비 표면에서 1m 떨어진 곳에서 측정 한 음압레벨⁽⁵⁾이 주어진 기준치보다 작아야 한다.

장비의 진동 즉 고체음(structure-borne noise)은 장비로부터 멀리 떨어진 지점까지 전달되어 선박전체에 걸쳐 소음·진동을 발생시킬 뿐만 아니라 합정과 같이 수중방사소음이 매우 중요한 경우 상대방에게 노출될 가능성을 높이기 때문에 중요한 문제로 취급되고 있다. 고체음은 장비 종류(예를 들어 내연기관, 펌프, 웬 등)에 따라 기준치^(1,3)가 달라지며 가속도레벨을 측정하여 기

준치와 비교한다. 장비의 소음·진동을 줄이기 위해서는 근본적으로 설계단계에서부터 많은 노력을 기울여야 하며 특히 고체음의 감소를 위해서는 장비의 하부구조와 장비가 설치되는 지지대도 함께 고려하여 방안을 강구해야 한다.

MIL-STD의 관련기준⁽¹⁻³⁾에 따라 시험하는 경우 장비는 실제 합정에서 탄성지지되는 여부와 관계없이 시험을 위해 탄성지지되어야 한다. 탄성마운트, 베드플레이트 등은 통상 합정에 설치되는 지지구조를 사용하여야 한다. 대부분의 장비는 합정에서 탄성지지되지만 오수처리장치 등 일부 장비는 볼트로 지지대위에 바로 강체 연결된다. 이 경우에 마운트 없이 지지대위에서 가속도를 측정하는 경우 장비가 갖는 고유의 고체음을 측정하기 보다는 지지대의 강성을 측정하는 경우가 되므로 MIL-STD 측정에서 요구하는 의미와 전혀 다르게 된다. 따라서 적절한 탄성마운트를 설치하고 측정하며 강체 지지의 경우 측정치에서 15 dB를 빼서 기준치와 비교하도록 되어 있다.

펌프는 합정에 설치되는 많은 보조기기 중에서 수량도 가장 많으며 매우 중요한 기능을 담당하고 있다. 펌프의 공기음과 고체음은 각각 Grade D, Type II에 속하며 측정위치 및 방법, 기준치 등은 참고문헌 (1~3)에 나와 있다. 이 글에서는 펌프, 공기압축기 등 합정에 널리 사용되는 장비의 공기음과 고체음의 저감사례에 대해 기술하였다.

2. 공기음 감소

공기음은 음압(sound pressure level)을 사용하는 경우와 음향과위(sound power level)를 사용하는 두가지로 구분된다. 두 방법 모두 장비표면에서 1m 떨어진 점에서 측정하는데 음압은 바닥을 제외한 5면의 중심에서 측정하며 음향과위는 ISO 3744⁽⁴⁾에 따라 측정하는데 추가로 코너에서의 4점을 포함하여 모두 9점에서 측정한다. 장비크기가 커지면 측정점도 많아진다.

장비 표면에서 1m 떨어진 점의 평균 음압을 L_w 라고 하고 그 위치에서 장비를 감싸는 가상 표면적을 S 라고 하면 음향과위 L_w 는 다음과 같이 주어진다.

$$L_w = L_p - K + 10 \log(S)$$

단, K 는 주위 반사체의 영향이 없는 자유 음장(free field)에서의 레벨로 보정하는 계수이며 대부분의 공장에서는 2 dB 내외로 주어진다. 또한 펌프류의 경우 $10 \log(S)$ 는 13~17 dB로 주어진다.

공기음 측정시 국부적으로 높은 소음이 발생하는 위치는 피해야 한다. 특히 모터 냉각용 팬의 공기유동 근처는 국부적으로 소음이 높게 발생하므로 주의를 요한다. 또한 펌프의 경우 가동을 위해 배관이나 밸브 등 임시 구조물을 설치하는데 실제 함정에 설치할 때는 배관은 선체 벽이나 바닥에 유연연결부(flexible joint)로 연결되므로 공장에서 수행하는 시험과는 전혀 다른 환경이므로 배관 등 주변 임시 구조물에서 발생하는 소음은 펌프 본체와는 구별되어야 한다.

먼저 펌프의 소음저감사례를 살펴보면 대상펌프는 회전수가 3550 rpm, 유량은 227 m³, 중량은 1600 kg, 크기는 대략 2 m × 1 m × 1.5 m (L × W × H)이다. 펌프소음의 주원인은 모터와 펌프본체로 구분되는데 모터만의 소음을 보기 위해 부하가 없는 상태에서 모터를 구동하고 소음을 측정하였다. 음향과위를 표 1에 기준과 비교하였는데 표면적효과는 15 dB로 가정하였다. 모터만 가동하여도 500 Hz~4 kHz에서 기준을 초과함을 알 수 있다.

모터소음의 주원인은 냉각용 팬으로, 팬 소음은 풍량이 커질수록 증가하는데 풍량은 회전수와 블레이드 형상에 관련된다. 팬 소음만을 고려한다면 rpm을 낮추는 것이 가장 효과적이거나 회전수를 낮추는 것은 펌프성능과 관련되므로 사실상 불가능하다. 모터냉각용량을 검토한 결과 풍량을 줄이면 온도는 다소 올라가지만 모터

표 1 모터만의 공기음(음향과위, dB)

Hz	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
L _w	81	100	90	99	107	100	99	95	89
기준	122	117	112	107	97	92	92	92	92

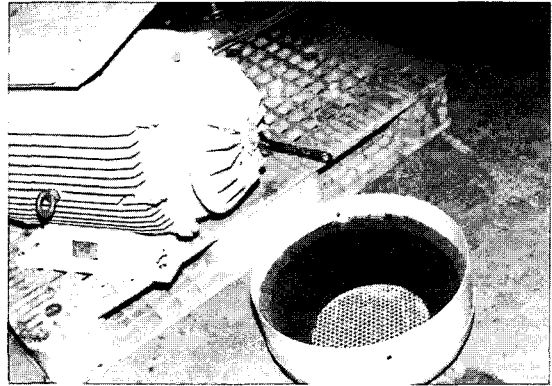


그림 1 펌프 모터 소음저감(커버내에 흡음재를 부착함)

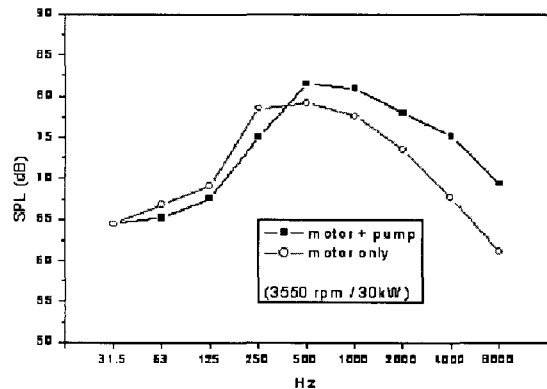


그림 2 모터소음 기여도

성능에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단되어 블레이드 크기를 약간 줄이기로 하였다. 또한 팬 전방의 소음이 가장 크므로 추가적인 소음감소를 위해 그림 1처럼 팬 커버 내부에 공간의 여유가 있으므로 두께 25t의 흡음재를 안쪽에 붙였다.

그림 2에는 모터와 펌프의 소음을 비교하기 위해 커플링을 풀고 모터만 가동한 상태와 모터/펌프가 함께 가동한 상태의 소음을 비교하였는데 모터 소음은 기여도가 크지 않음을 보여준다.

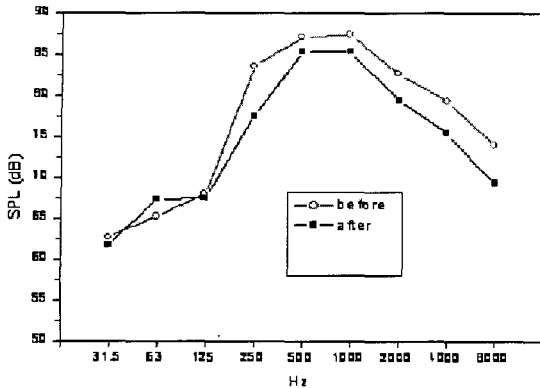


그림 3 음향파워비교

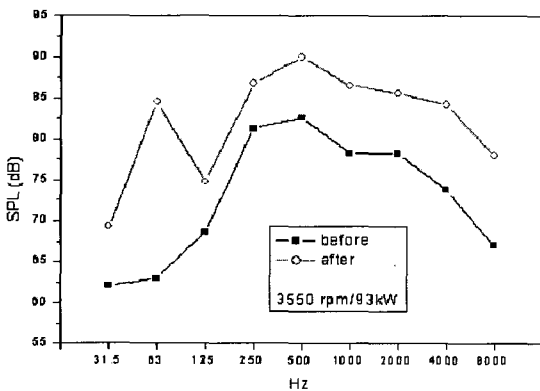


그림 4 개선 전/후 공기음비교

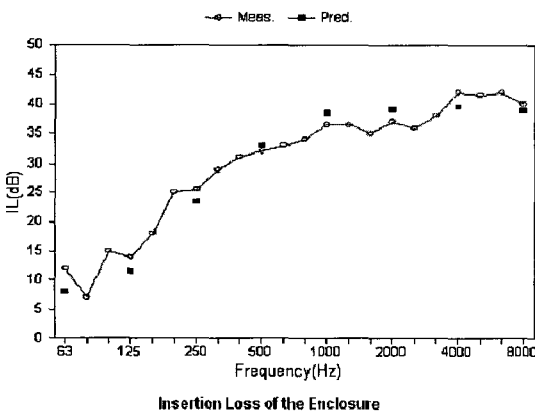


그림 5 차음상자의 삽입손실(대형 디젤엔진용)

펌프 배관 및 밸브 소음, 토출구 소음의 영향도 무시할 수 없는데 그림 3에는 토출구 배관을 수면 밑으로 놓기 전과 후의 소음을 비교한 것으로 측정위치는 모터 전방 1m이며 고주파수대역에서 약 4~5 dB 감소하는

것을 볼 수 있다. 배관구성을 가능한 한 소음이 적게 나는 방향으로 개선하였는데 엘보우 배관을 유체가 빠른 속도로 지나가면 직관보다 소음이 더 발생하므로 펌프 입·출구 주변에는 직관을 사용하고 곡관은 펌프에서 멀리 떨어뜨려 배치하였으며 밸브도 소음을 발생하므로 멀리 떨어뜨려 설치하였다.

소음감소를 위한 개선 후의 소음레벨을 개선 전과 그림 4에 비교하였는데 모터 쪽 전방 1m의 음압레벨을 나타냈으며 5~7 dB 정도 소음이 감소하였음을 알 수 있다.

차음상자(Sound enclosure)는 공기음을 줄이는 강력한 수단인데 소음원을 감싸서 소음의 전파를 근본적으로 차단하는 방법으로 매우 효과적이지만 반면 장비의 무게와 크기가 증가하고 차음상자의 통풍 등 추가로 고려해야 할 사항이 발생한다. 그림 5에는 대형 디젤엔진용 차음상자의 삽입손실을 보였는데 판넬은 1.5 mm 강판에 내부에는 70 mm의 유리섬유가 부착되어 있다.

3. 교체음 감소

고체음감소를 위한 기본요인으로 적절한 탄성마운트를 선정하여야 하며 바닥지구조의 강성이 커야 한다. 일반적으로 탄성마운트의 강성보다 바닥지부의 강성(impedance)이 20 dB 이상 큰 것이 바람직한데 실제 합정의 장비받침대는 강성이 취약한 경우가 종종 발생하여 마운트상단보다 하단의 가속도가 큰 경우도 측정된다.

공기음 측정은 주변 다른 장비의 가동이 큰 영향을 주나 고체음은 일반적으로 큰 영향은 없지만 주변의 다른 대형장비는 가동을 중지시켜야 하며 크레인이나 해머 작업등도 영향을 미치므로 금해야 한다. 특히 용접작업이 있는 경우 전기적 주변 소음을 크게 증가할 수 있으므로 주의를 요한다.

펌프와 같은 회전기계의 경우 축정렬(alignment)과 밸런싱이 매우 중요하며 장비의 무게중심을 고려하여 마운트 배치가 되어야 한다. 또한 배관, 덕트 등 주변 구조물은 유연연결부(flexible joint)로 연결하여 고체음의 전달이 없도록 절연시켜야 한다.

앞서 고려한 펌프고체음 저감사례를 살펴보면 먼저 모터가 고체음에 미치는 영향을 보기 위해 모터 하부 모서리에 탄성마운트 4개를 설치하고 마운트상단에서

가속도를 측정하였다. 탄성마운트는 펌프/모터 구조 밑에 설치되는 것과 같은 것이며 참고문헌(1,3)에 의하면 탄성마운트 상단에서 측정하도록 되어있다. 가속도를 1/3 옥타브 밴드에 대해 측정하며 다음과 같이 dB로 표시한다.

$$L_a = 20\log(\text{가속도} / 10^{-5} \text{ m/s}^2)$$

부하가 걸리지 않은 상태에서 모터만 가동할 때의 고체음을 그림 6에 나타냈는데 모터 회전주파수에 해당하는 63 Hz와 2배수인 125 Hz에서 기준치보다 최대 13 dB 높은 레벨을 보인다.

초기 설계방안으로는 단일 마운트 구조를 채택하였으나 모터 고체음 측정 결과를 보면 단일 마운트 구조로는 도저히 기준을 만족시킬 수 없을 것으로 판단되었다. 따라서 고체음의 감소를 위해서는 이중 탄성지지 구조의 채택이 불가피함을 알 수 있다.

상부의 공통베드도 하부베드처럼 H-beam 용접구조로 제작하였으며 상부 마운트로 2가지 종류를 검토하였다. (1) 안은 코일스프링으로 된 형태이며, (2) 안은 고무로 된 형태이다. (1) 안의 경우 공진 주파수는 3.5 Hz로 계산된다.

마운트의 공진주파수가 회전주파수에 비해 매우 작기 때문에 이론적으로는 고체음 감소효과는 충분할 것으로 예상된다. 상부마운트 상하단(upper, lower)의 측정

결과를 그림 7에 보였는데 상부 마운트의 효과는 대략 10~20 dB로 이중탄성구조의 효과는 전 주파수영역에서 분명하다. 그러나 400 Hz~500 Hz에서 매우 근접하거나 3~5 dB 초과하며 3150 Hz~4000 Hz에서 기준을 5~10 dB 초과한다. 상부 마운트의 코일 스프링이 진동하는 상태로 비추어 보아 고주파수의 진동이 코일 스프링을 타고 하부 베드로 전파하는 것으로 추정된다.

스프링 마운트는 고주파수에서 고체음차단효과가 떨어지며 특히 충격시험시 구조적인 안정성이 의문시 되므로 고무마운트로 변경하여 다시 측정하였다. 새로운 마운트는 고체음 차단과 내충격성을 동시에 만족해야 하며 고유진동수는 4.5 Hz로 가진주파수 60 Hz에 비해 충분히 작다. 각 위치(point 1에서 4, 장비의 모서리)의 고체음은 스프링 마운트 경우보다 낮아져서 모두 기준을 만족하는 것으로 나타났으며 그림 8에 결과를 나타냈다.

두 번째로 오수처리기의 저감사례를 살펴보면 그림 9에서 모터/블로워(blower)의 진동이 주원인으로 특히 2000 Hz, 2500 Hz 성분은 블로워의 날개수에 기인하는 것을 알 수 있다. 모터지지부가 구조적으로 취약하므로 이를 보강하고 밑에 고무패드를 삽입하였는데 개선전과 후의 고체음 레벨을 그림 10과 11에 각각 보였는데 2500 Hz 성분이 크게 감소하였음을 보여준다.

세 번째 사례는 공기압축기로 마운트는 그림 12에 보인 것처럼 와이어형(wire type)으로 와이어 중심축방향

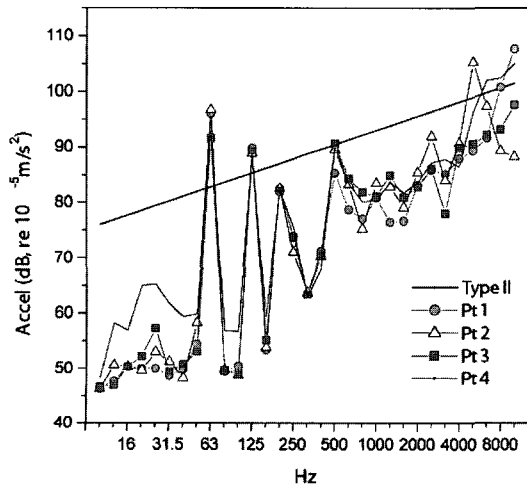


그림 6 모터자체의 고체음

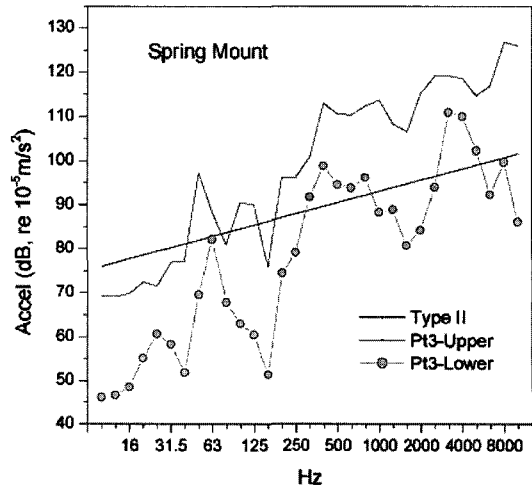


그림 7 스프링마운트 사용시 고체음

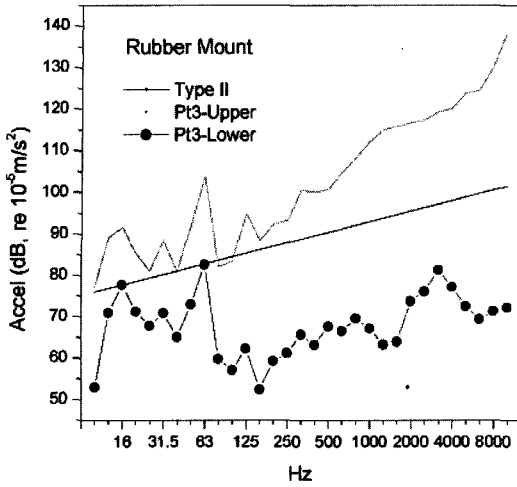


그림 8 고무마운트 사용시 교체음

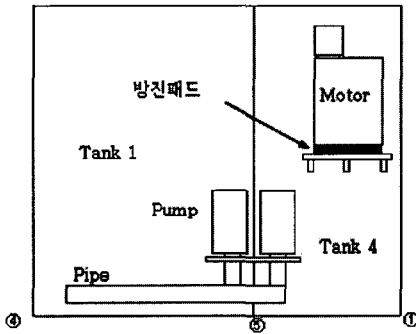


그림 9 오수처리기

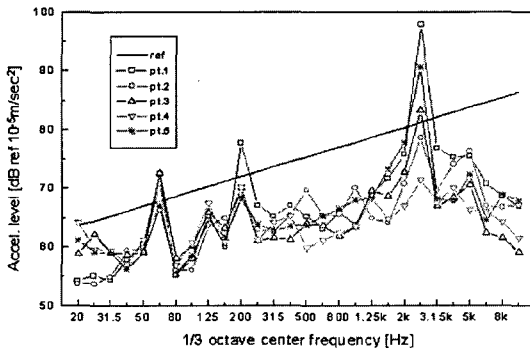


그림 10 개선 전 오수처리기 교체음

으로는 어느 정도의 강성이 있으나 수평방향으로는 매우 취약한 특성을 보인다. 초기 설계는 단일 탄성지지에 한쪽방향으로만 와이어형 마운트를 설치하였으나

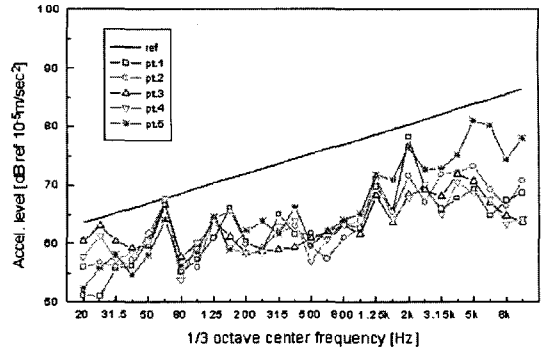


그림 11 개선 후 오수처리기 교체음

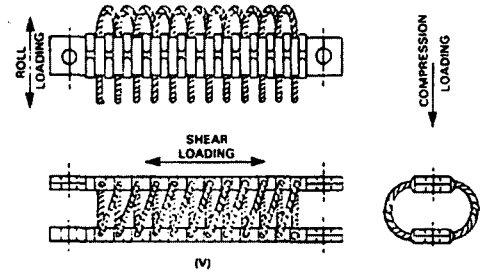


그림 12 와이어형 마운트

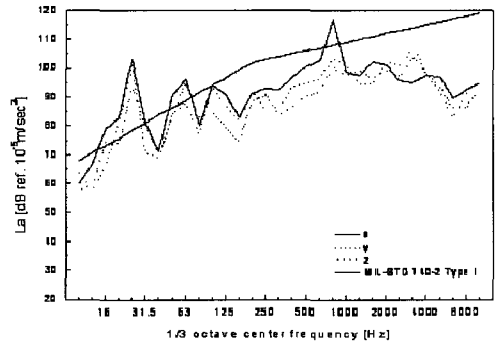


그림 13 공기압축기 교체음(개선 전)

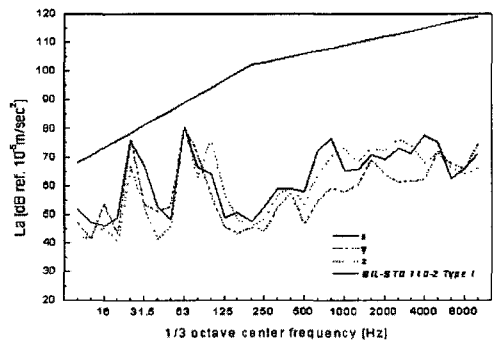


그림 14 공기압축기 교체음(개선 후)

개선책으로 이중탄성지지구조에 마운트를 90도 바라 보게 설치하였다. 그림 13과 14에 개선전과 후의 레벨을 비교하였는데 현저한 저감효과를 보여준다.

4. 맺음말

함정용 펌프의 공기음 측정시 배관, 밸브, 토출구위치 등이 큰 영향을 미치므로 펌프/모터 본체의 소음만 측정되도록 많은 주의를 기울여야 한다. MIL-STD 측정의 취지는 국부적인 이상소음을 찾아내어 기준만족여부를 판정하기보다는 장비의 평균적인 소음레벨을 측정하고 평가하여 소음저감방안을 강구하는데 있다고 보아야 한다.

고체음은 펌프나 공기압축기의 경우 일반적으로 단일탄성구조로는 기준을 만족하기가 어려우며 이중탄성구조가 해답이 되는 경우가 많다. 적절한 탄성마운트의 선정이 매우 중요한데 단순히 질량-스프링 시스템으로 간주하여 고유진동수를 계산하여 회전주파수와 피하게 하는 방법만으론 충분치 않다. 회전기기의 경우 측정결과 밸런싱은 반드시 점검하여야 하며 펌프류의 경우 배관, 밸브 등 주변 구조물에 의한 영향을 최소화하는데 많은 주의를 기울여야 한다. ☞

참고문헌

- (1) MIL-STD 740B, 1965, Airborne and Structure-borne Noise Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment.
- (2) MIL-STD 740-1(SH), 1986, Airborne Sound Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment.
- (3) MIL-STD 740-2(SH), 1986, Structure-borne Vibratory Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment.
- (4) ISO 3744, 1994, "Determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Pressure - engineering Methods in an Essentially Free Field Over a Reflecting Plane."

소음·진동 측정 및 평가 방법론