

# 3. 기술동향

## (2) 진동평가규격

### 선박용 회전기계의 진동평가 규격 Vibration Evaluation Criteria of Rotating Machinery in Ships



양보석  
B-S Jung

- 부경대학교, 기계공학부
- (사) 한국박용기관학회 학술이사
- E-mail : bsyang@pknu.ac.kr

#### 1. 진동 평가의 목적

일반적으로 진동을 평가하기 위한 한계치 (limits), 허용치(allowable value) 또는 등급 (level)과 같은 기준(standards)을 정하는 주된 특징과 목적은 다음과 같다.

- (1) 기계상태의 동적인 원활함을 대표하고, 평가에 용이
- (2) 기계설비의 진동품질을 평가하는 승인시험 (acceptances testing)을 공통의 기준에서 수행 가능. 공장 시운전시와 현장설치 후, 사용 회전속도에서의 진동치에 대한 한계치와 등급을 표시함으로써 제작자가 사용자에게 제품을 인도 시에 유용
- (3) 운전중인 기계들의 상태감시(condition monitoring) 수단으로 유용
  - 양호한 운전상태로부터의 이탈정도를 표시
  - 기계의 연속운전에 대한 가부판단을 용이
  - 향후 운전지침 표시 및 판단의 지표
  - 기계의 분해점검시기를 결정하는 지표

즉, 미리 결정된 기준과 측정된 진동치를 비교·검토하여, 기계설비의 상태를 판정하는 자료로 유용하게 이용될 수 있다.

#### 2. 진동 평가기준의 특징 및 최근 경향

진동의 크기는 기계의 사양, 종류, 형식 및 사용목적에 따라 각각 다르며, 또한 동일 도면, 동일 가공 기계를 이용하여 제작하여도 각각 다르게 된다. 따라서 개개의 기계(예로, 디젤기관, 증기터빈, 압축기, 펌프 등)에 따라 별도의 진동 한계치가 필요하게 된다. 그러나 일 예로, 동일한 펌프에서도 형식이나 구조에 따라 각각 한계치가 다르므로 일괄적으로 규정하기에는 어려움이 따른다. 그러므로 규격의 진동한계치 또는 기준치를 참조하여, 각 기계에 대한 정상, 이상의 판별기준을 설정할 필요가 있다.

최근 오랜 경험에 따라 사고의 조기발견, 판단의 정도향상 및 2차 피해의 방지에는 진동변위에 의한 축진동(shaft vibration)의 계측이 베어링하우징에서 측정된 진동가속도보다 유리함이 입증되고 있고, 또한 축진동에 대한 계측신뢰성의 향상으로 광범위한 기계진동 평가에 이용이 가능하게 되었다. 축진동에 의한 평가경험은 유럽에 비해 미국이 풍부하고, API규격에 널리 채용되고 있다. 이러한 배경으로 ISO에서 처음으로 체계적인 축진동 평가규격 ISO 7919를 제정하고, 이 규격의 체계에 맞추어 베어링 진동도 대폭 개정하여 ISO 10816 규격을 제정하게 되었다.

아울러 WTO 발효 이후 각국의 규격이나 인증제도가 무역에 있어 장애가 되지 않도록 국가규격을 국제규격에 부합화 시키도록 한 의무사항인 무역에 관한 기술장벽협정(TBT)에 의해 현재 각국의 국가규격을 국제규격에 통합하려는 노력이 계속되고 있고, 우리 나라를 비롯하여 선진국에서는 ISO, IEC 등의 국제규격을 번안하여 국가규격(KS, JIS 등)으로 제정토록 되어 가는 추세이다.

### 3. 진동측정 및 평가척도

현재로는 베어링에서 측정된 베어링진동(bearing vibration) 또는 베어링이나 그 부근에서 측정된 축진동(shaft vibration)이 판정을 위한 신뢰할 수 있는 진동데이터이고, 따라서 기계진동을 대표하여 측정하는 것이 일반적이다. 이 외에 측정이 가능한 부분도 있으나, 기계구조에 의해 제약을 받고 일반성이 결핍된다.

베어링 부분에서 측정된 진동으로 기계의 모든 부분의 진동상태를 파악할 수 있는 것은 아니지만, 많은 부분에서의 측정을 의무화하거나 한정된 부분의 측정으로 이외의 다른 부분에 대한 상태를 추정하는 방법까지 규정하는 것은 규격의 내용을 복잡하게 하고, 그 결과 실용상 부적절한 것으로 되기 쉽다. 표 3.1은 베어링진동과 축진동의 특징을 비교한 것이다.

규격은 공통적으로 일반성이 있는 평가가 가능하여야 한다. 그러므로 대부분의 경우, 적절한 판

단이 가능하다면, 규격은 가능한 한 단순한 형태로 그리고 측정도 용이한 것이 바람직하다.

#### 3.1 베어링 진동

베어링은 회전체(rotor)를 지지하고, 반력(reaction force)을 직접 받으므로 고장율이 비교적 높은 기계요소이다. 그리고 구조는 대부분의 경우 매우 유사하다. 이러한 특징을 가지는 베어링 부분에서의 진동측정은 평가의 목적에 적합하고 측정이 용이한 면도 있어서 1936년 T. C. Rathbone에 의해 제안된 기준으로부터 시작하여 오래 전부터 베어링진동에 기초한 많은 규격이 제안되어 왔고, 또한 많은 측정 데이터가 축적되어 있어 폭넓게 세계적으로 이용되어 왔다. 이 기준의 특징은 진동의 척도로서 진동속도의 실효값(rms ; root mean square 값)인 진동 심각도(vibration severity)가 사용된다. 이는 진동의 평가가 보다 쉽고 정확하게 이루어질 수 있기 때문이다.

##### 3.1.1 측정

베어링진동의 측정방향은 그림 3.1에 나타내듯이 축의 회전중심을 통과하는 3방향, 즉 축방향(A ; axial direction)과 베어링하우징 중심의 수직방향(V ; vertical direction) 및 수평방향(H ; horizontal direction)에서 측정하는 것이 원칙이다. 측정위치는 그림 3.1과 같이 대상기계에 따라 각각 다르고, 일반 수평형 기계에서는 지지베어링 위치에서, 수직형 기계(그림 d)에서는 전동기 상부 베어링, 베어링 지지대 플랜지부 그리고 베이스 플

표 3.1 베어링 진동과 축진동 측정의 비교

	베어링 진동	축진동
장 점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 측정 데이터가 풍부</li> <li>· 한계치가 널리 알려져 있음</li> <li>· 측정기기의 높은 신뢰성</li> <li>· 변환기의 부착과 탈착, 수리가 용이</li> <li>· 진동측정이 용이</li> <li>· 계측기 가격이 저렴</li> <li>· 측정점의 결정이 용이</li> <li>· 장소의 영향이 적음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 베어링진동보다 측정 감도가 양호</li> <li>· 진동응답이 신속(이상이 발생시, 베어링 진동치의 변화 보다 앞서 변화)</li> <li>· 한계치 설정을 위한 기본량(예로 불평형)에 대해 직접적</li> </ul>
단 점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 진동측정감도가 비교적 낮음</li> <li>· 유연축에 강한 케이싱의 경우, 과도적인 진동변화나 이상 진동의 검출감도가 둔감</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 측정기기(특히 변환기)의 신뢰성</li> <li>· 부착방법의 제약</li> <li>· 측정장소에 따른 측정치의 차가 발생</li> <li>· 계측장비가 비교적 고가</li> </ul>

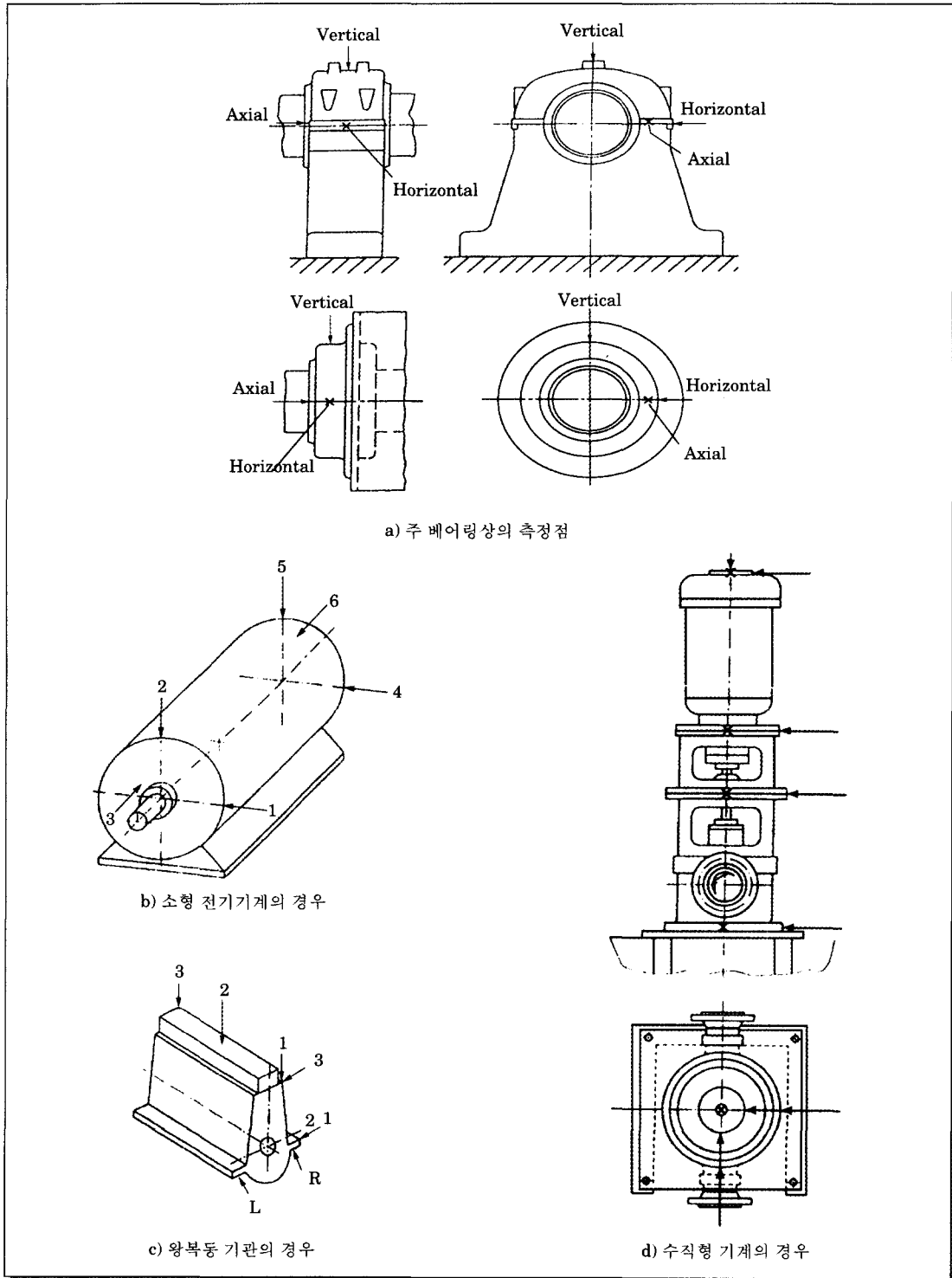


그림 3.1 측정위치와 방향 (ISO 10816/1)

레이트부 등에서 측정한다.

기계는 부하, 회전수 등의 운전조건과 설치상태에 따라 진동상태가 다르게 된다. 그러나 이들을 고려한 각각의 허용치를 정하는 것은 어려우므로 규격에서는 일반적으로 정격회전수의 정상운전상태에서의 허용치(한계치)만을 규정하고 있다. 또한 제작공장 내에서 승인시험 시 설치조건을 정하는 것은 어려운 문제이기 때문에, 일반적으로 실제 사용상태에 가능한 맞추도록 규정하고 있다.

### 3.1.2 평가척도

회전기계의 측정에서는 진동의 크기를 나타내는 척도로서 진동변위(displacement)의 양진폭(p-p; peak-peak)과 진동속도의 편진폭(p; peak) 실효치(또는 진동 severity)를 일반적으로 채용하고 있다. 특히, 베어링진동의 경우는 진동속도의 실효치를 일반적으로 이용하고 있고, 이 척도는 다음과 같은 특징이 있다.

- (1) 진동변위로 나타낸 규격의 한계치들은 진동수에 거의 반비례하고, 이는 진동속도에 대해서는 거의 일정하게 된다. 그러므로 진동속도를 척도로서 한계치를 설정할 경우에는 도표가 필요 없고, 몇 개의 진동수 성분이 혼합된 진동의 평가 시에는 진동수마다의 진동크기를 측정하거나 그 합성을 위한 계산을 하는 번잡함이 필요 없다.
- (2) 진동에 의한 동적인 응력에 주의해야할 부분은 베어링이다. 베어링 등의 진동에 의한 부재의 파손은 진동속도에 일반적으로 비례한다.
- (3) 피크치보다도 실효치의 평가가 정확하다. 특히 고차 조화성분이나 비동기 성분을 포함하는 경우에는 실효치의 경우가 올바른 평가가 가능하다.

진동속도의 rms치는 진동속도의 시간기록 v(t)로부터 다음 식에 의해 구해진다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(T) dt}$$

스펙트럼분석으로 진동가속도, 속도 및 변위진폭의 크기(magnitude)가 각각  $a_j(\text{m/s}^2, \text{p})$ ,  $v_j(\text{mm/s}, \text{p})$ ,  $s_j(\mu\text{m}, \text{p-p})(j=1, 2, \dots, n)$ 로 되고, 이들이 진동주파수  $f_j(\text{Hz})(j=1, 2, \dots, n)$ 의 함수로서 얻어졌을 때는 이에 대응하는 rms속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{2}(v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2)} \\ &= \pi \times 10^{-3} \sqrt{\frac{1}{2}[(f_1 s_1)^2 + (f_2 s_2)^2 + \dots + (f_n s_n)^2]} \\ &= \frac{10^3}{2\pi} \sqrt{(a_1/f_1)^2 + (a_2/f_2)^2 + \dots + (a_n/f_n)^2} \end{aligned}$$

진동이 단지 두 개의 주요한 주파수성분으로 주어지는 경우, 이들 rms값을  $v_{min}$ ,  $v_{max}$ 라 하면,  $v_{rms}$ 는 근사적으로 다음 식으로 결정된다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2}(v_{max}^2 + v_{min}^2)}$$

어느 하나의 특정진동수 성분이 탁월할 때는 다음 식과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} v = \frac{\sqrt{2}}{2} \times 10^{-3} \cdot s \cdot \pi f = 2.00 \times 10^{-3} s f$$

여기서  $v$ 는 진동속도의 편진폭(mm/s, p),  $s$ 는 진동변위의 양진폭( $\mu\text{m}, \text{p-p}$ ),  $f$ 는 탁월 진동주파수(Hz)이다. 진동가속도, 속도 또는 변위값 사이의 환산은 단지 단일주파수의 조화성분의 경우에 한해 이루어질 수 있다. 예로, 단일 주파수성분의 진동속도  $v_i$ 가 알려져 있으면 양진폭변위  $s_i$ 는 다음 식으로 평가된다.

$$s_i = \frac{450 v_i}{f_i} (\mu\text{m}, \text{p-p})$$

### 3.2 축 진동

회전기계 진동의 원인은 대부분 회전축에 관계된다. 따라서 축의 거동을 직접 측정하고, 이를 판정하는 것은

- (1) 판정의 정밀도 향상

- (2) 이상의 조기발견
- (3) 2차 피해의 회피

등을 위한 바람직한 방법이라 할 수 있다. 특히 다음과 같은 진동현상에 대한 위험판별에 매우 유리하다.

- (1) 케이싱에 대한 회전축의 접촉(rubbing)
- (2) 베어링부의 부품의 파손 등에 의한 불평형(unbalance)의 급격한 변화
- (3) 베어링의 편위, 침식, 마멸(wear), 회전체의 굽힘 등에 의한 불평형의 완만한 변화
- (4) 회전축의 자려진동

3.2.1 측정

축진동은 회전체와 정지부분의 접촉을 예방하기 위해서 좌우 베어링의 거의 중간위치 또는 최소 틈새부분(예로 비접촉 시일부분)에서 측정하는 것이 좋다. 또한 베어링에 대한 과대한 응력의 예방에는 베어링 또는 그 부근에서 측정하면 좋다. 그러나 회전체의 중앙부근에서 측정하는 것은 일반적으로 불가능하므로 주로 베어링이나 그 부근에서 측정하도록 하고 있다. 이 경우 베어링으로부터의 거리, 또는 진동모드(mode)에 의해 측정치에 차가 발생하게 되지만, 일반적으로는 동일한 한계치를 채용하고 있다. 측정방향은 수평기계에서는 축 단면의 수평과 수직방향 또는 이와 45° 이내 경사진 두 방향에서 측정한다.

3.2.2 상대진동과 절대진동

축진동에는 절대진동(absolute vibration)과 상대진동(relative vibration)의 2가지 계측이 있다. 따라서 축진동의 측정과 평가에는 이 중 어느 것인가를 명확히 하여야 한다. 절대 축진동은 정지공간에 대한 축의 진동으로, 그 측정은 사이즈모형 변환기(transducer)에 의해서 가능하고, 구조상으로 접촉형 변위계가 이용된다.

상대 축진동은 축과 베어링 또는 케이싱과 같은 진동변환기의 부착부분과의 상대적인 진동으로 비접촉형 변위계가 주로 이용되고 있다. 비접촉 변위계로 절대진동을 측정하기 위해서는 변환기를

사이즈모형 변환기와 조합하거나, 변환기 부착부분의 절대진동을 별도의 사이즈모형 절대변환기에서 검출하여 벡터가산을 하는 방법이 필요하다.

일반적으로 베어링파손의 원인이 되는 진동에 의한 과대한 하중이나 응력, 회전부와 정지부사이의 접촉에 의한 중대한 사고를 방지하기 위한 반경방향틈새의 감시(monitoring)등에는 상대진동이 유리하다. 한편 이상의 조기발견을 위하여 정상적인 운전상태의 진동으로부터의 변화를 평가하는데는 변환기 부착부분의 진동의 영향이 없는 절대진동이 유리하다. 따라서 어느 진동을 채택하여 평가할 것인가는 대상기계와 각각의 특징을 고려하여 결정한다.

3.2.3 평가척도

축진동 평가의 척도로는 진동변위진폭(최대치)이 적절하고, 대부분 이를 채용하고 있다. 회전체 각 단면에서의 축중심 궤도(orbit)는 일반적으로 원형이 아니고 타원형이 되므로, 그 장축의 방향이 수직이나 수평으로 되지 않는다. 따라서 장축이 수평축과 이루는 각도는 각각의 단면에서 다른 각도로 되는 경우가 있다. 또한 운전주파수 이외의 조화성분이 포함되면 더욱 복잡한 형으로 된다.

종래의 규격에서는 수직 또는 수평방향 중 어느 방향의 축진동을 측정하여도 되었지만, 이와 같은 축 궤도의 형상을 고려하여 최근의 규격에서는 직교하는 두 방향의 축진동을 측정하도록 되었다. 축진동 변위를 나타내는 방법으로는 그림 2의 정의에 의해 다음의 3가지 근사적인 방법이 이용된다.

방법 1 : 두 직교방향에서 측정된 양진폭 변위값의 합성치

$$S_{(p-p)max} \doteq \sqrt{S_{A(p-p)}^2 + S_{B(p-p)}^2}$$

이 방법은 원형 궤도일 때 최대 40%의 오차로 과대 추정되며, 직선 궤도일 때 오차가 최소(0%)로 된다.

방법 2 : 두 직교방향의 양진폭 변위값 중 큰 값

$$S_{(p-p)max} \doteq [S_{A(p-p)}, S_{B(p-p)}]_{max}$$

이 방법은 미국, 석유화학산업에서 주로 사용되며, ISO 7919에 채용되고 있다. 직

선 패도일 때 최대 30%의 오차로 과대 추정되며, 원형패도일 때 최소(0%)로 된다.

**방법 3 : 축 패도의 최대치**

$$S_{max} = [S_1(t)_{max}] = [\sqrt{S_A^2(t) + S_B^2(t)}]_{max}$$

이 방법은 주로 유럽에서 사용되며, VDI 2059에 채용되고 있다.

근사적으로  $S_{(p-p)max} \approx 2S_{max}$ 로 된다. 여기서  $S_{max}$ 는 다음과 같이 구한다. 먼저 직교 2방향(A, B방향) 진폭파형의 평균치로부터의 편차  $S_A(t)$ 와  $S_B(t)$ 를 구한다.

$$S_A = x(t) - \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} x(t) dt$$

$$S_B = y(t) - \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} y(t) dt$$

그 출력을 시시각각 합성하여 합성치의 최대치  $S_{max}$ 를 다음과 같이 구한다.

$$S_{max} = [S_1(t)_{max}] = \sqrt{S_A(t)^2 + S_B(t)^2}_{max}$$

위의 어떤 근사적인 방법도 축 패도의 형상에 따라서 오차를 발생하고, 실용적으로는 방법 2와 방법 1이 많이 사용된다.

이하에서는 선박용 회전기계의 진동평가를 위해 널리 사용되는 VDI, MIL, VCI, 선급협회 지침, ISO 및 기타 학회 규격의 개요를 설명한다.

**4. VDI 규격**

**4.1 VDI 2056(1964) : 기계진동의 판정기준**

독일기술자협회(VDI)가 1955년에 조사를 시작하여 1964년 제 2판으로서 완성한 베어링 진동의 규격이다(표 4.1). 이 협회에서는 Rathbone 규격 이후의 각종 규격을 조사함과 동시에 독자적으로 계측 데이터를 수집하여 넓은 분야의 기계에 적용이 가능하도록 규격을 제정하였고, 이후 여러 나라에서 채용되어 왔다. 평가척도로서는 진동속도의 실효치(rms치, mm/s)를 이용한다. 이 규격의 특징으로는

- 1) 진동심각도(vibration severity)를 평가척도로서 채용

**표 4.1 VDI 2056 (1964)**

45	Not permissible	Not permissible	Not permissible	Not permissible
28				
18	Just tolerable	Just tolerable	Allowable	Allowable
11.2				
7.1	Allowable	Allowable	Good	Good
4.5				
2.8	Good	Good	Good	Good
1.8				
1.12	Good	Good	Good	Good
0.71				
0.45	Group K	Group M	Group G	Group T
0.28				
0.18				

- 주) 1) 그룹 K : 약 15kW까지의 전동기 및 이에 상당하는 소형기계
- 2) 그룹 M : 15~75kW의 전동기 및 특별한(견고한) 기초상의 약 300kW까지의 중형기계
- 3) 그룹 G : 높은 고유진동수를 가지는 강기초상의 대형기계
- 4) 그룹 T : 낮은 고유진동수를 가지는 경량구조 기초상의 대형기계(예로, 터보기계)
- 5) 그룹 D : 평형잡이가 이루어지지 않는 질량을 갖는 강기초상의 기계(예, 왕복동기계)
- 6) 그룹 S : 그룹 D와 같은 종류의 기계로 탄성기초(예로, 방진지지)상의 기계

- 2) 기계의 크기와 종류에 대응하여 6개의 그룹으로 나누고, 그중 4개 그룹(K, M, G, T)에 대한 한계치를 제공(표 4.1)
- 3) 그룹 G/T는 기계의 크기(출력)가 같아도 기초나 베어링 강성의 차이에 맞추어 그룹을 나누고 한계치를 달리하였다. 주의할 것은 같은 기계라도 측정방향에 따라 평가의 그룹이 달라질 수 있다는 것이다. 예로, 수직방향의 진동은 그룹 G의 기계로서 평가하고, 수평방향의 진동은 그룹 T의 기계로서 평가하는 경우가 있을 수 있다.
- 4) 진동레벨은 진동속도를 0.18에서 45mm/s까지의 범위에 대해 양호(good), 허용(allowable), 견딤(just tolerable) 및 허용불가(not permissible)의 4종류로 규정한다.

**4.2 VDI 2063(1985) : 왕복동 기관 및 압축기의 기계적 진동의 측정과 평가**

VDI 2056은 기계의 진동상태평가를 위한 지침으로서 공급계약이나, 논쟁이 발생한 경우 전문가 의

건의 기초로서 오랜 기간동안 사용되어 왔고, 다양한 기계류에 대해 실제적으로 유용함이 입증되었다. 그러나 이 규격은 왕복 기계류의 허용 한계치를 포함하고 있지 않으며, 이는 일반 회전기계류들과 다음과 같은 특징에서 많이 차이가 있기 때문이다. 즉,

- 1) 진동질량(왕복동 질량)
- 2) 비정상 출력(입력) 토크
- 3) 주 지지요소와 엔진 및 기초사이의 교번력

왕복 기계류는 일반적으로 높은 진동레벨을 가지고 있어서 VDI 2056을 적용할 수 없다.

VDI 2063은 기계로부터 발생하는 진동만을 평가하고, 외부로부터 여기(가진)되는 진동은 포함되지 않으며, 이 규격의 적용 대상은 일반적으로 다음과 같다.

- 1) 강(rigidly) 또는 탄성적으로(resiliently) 설치된 왕복동 기관과 압축기
- 2) 100kW 이상의 출력 또는 입력
- 3) 3000 rpm까지의 회전속도

적용 대상기계로는 선박추진용 기관, 선박보조 기관, 디젤발전기 구동용 기관, 디젤전동차(기차, 전차)용 기관이 있으며, 육상 자동차용(트럭, 승용차, 자력추진 건설용 기계, 트랙터) 기관, 왕복동 기관과 결합된 기계류에는 적용할 수 없다. 이 규격의 목적은 유사하거나 같은 기관을 서로 비교할 수 있도록 하기 위한 단순한 특성치를 결정하는 것으로, 방사되는 소음에 관한 진동의 평가에는 사용할 수 없다.

왕복동 기관의 진동평가는

- 1) 기관에 설치된 구성품(components) 및 연결요소(배관 등)가 엔진블럭의 허용할 수 없는 강한 진동에 기인하여 손상될 수 있는 한, 트러블이 없는 운전(trouble-free operation)의 보장.
- 2) 인접 부분(seating, foundation, ground, adjoining building)에의 진동의 영향
- 3) 인접한 물체에의 응력 및 사람의 정신의 관점에 기초하며, 이 규격은 상기 1)항의 관점에서 평가가 목적으로, 건물이나 사람에의 영향

에 관한 진동허용치는 VDI 2057, DIN 4150 3편에서 규정하고 있다.

진동레벨의 특성치로서 진동속도의 실효치를 이용하며, 진동심각도는 그림 4.1과 같이 정해진 측정점에서 3개의 주방향(수평, 수직, 축)의 하나에서 측정된 진동속도 실효치의 최대값으로 정의하고 있다. 진동속도를 선택하는 이유는 경험적으로 가장 작은 변동범위를 갖기 때문이며, 어떤 경우는 진동속도에 부가하여 진동변위 및 진동가속도를 평가에 포함한다. 가능한 일정한 평가와 다른 엔진과의 비교를 확보하기 위해 선호되는 측정점은 그림 4.1에 표시된 3개의 주 방향(x, y, z)에서의 각 측정점으로, 다른 형식(vee 형, 수평형)의 경우도 유사한 측정점을 이용한다.

최대진동속도가 경험적으로 알려있는 경우는 그림에 정해진 모든 측정점을 고려할 필요는 없다. 예로 강지지된 왕복동 기관은 일반적으로 프레임(또는 실린더 커버)의 상단에서 최대 진동속도가 발생한다. 국부 공진(local resonant vibration)이 측정점에서 발생하지 않아야 하고, 기관에 설치된 구성품은 측정점으로 사용될 수 없다.

측정동안의 운전조건으로는 기관의 정격운전온

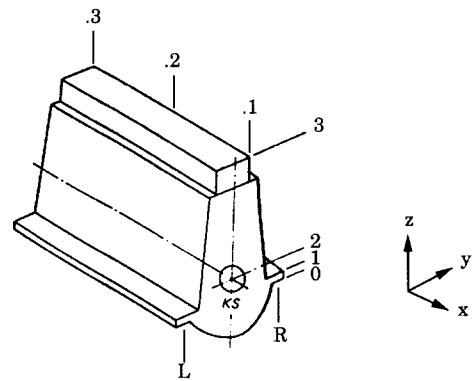


그림 4.1 수직 직렬기관의 측정위치

- 1) 측정면  
L : 커플링측에서 왼쪽, R : 커플링측에서 오른쪽
- 2) 측정레벨  
0 : 기초(foundation), 1 : 기관 베이스, 2 : 크랭크축 레벨, 3 : 프레임/실린더커버의 상단
- 3) 길이방향의 측정점  
.1 : 커플링축(KS), .2 : 기관 중간, .3 : 기관 자유단

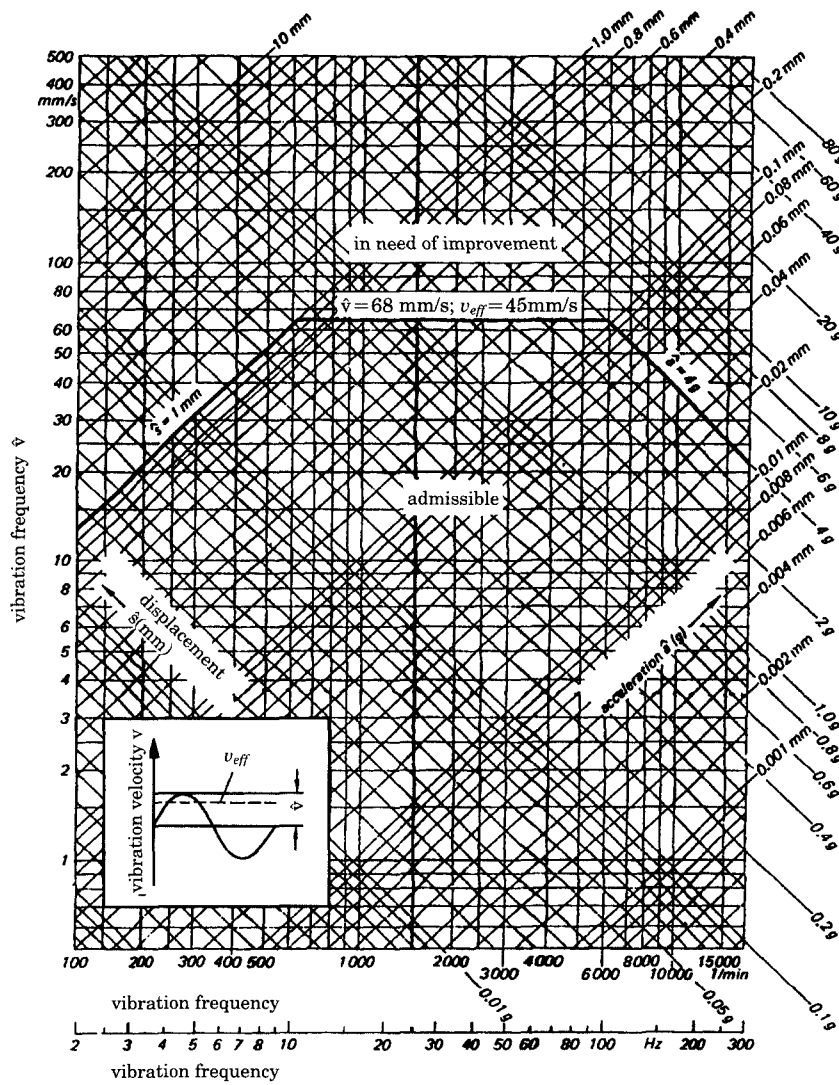


그림 4.2 왕복동 기계의 한계곡선(VDI 2603)

도에 도달한 정상상태 운전조건에서 측정하며, 연속운전을 위해 승인된 전 동력과 속도범위에서의 최대 진동속도를 이용한다.

그림 4.2는 현실적인 평가값이 되도록 하기 위해, 운전중인 많은 기관으로부터 수집된 측정결과를 이용하여 주파수의 함수로 허용진동값을 나타낸 것이다. 이 선도는 강지지 또는 탄성지지된 (resiliently seated) 기관에 모두 적용이 가능하며, 단순 정현진동의 진동속도에만 직접 적용이 가능

하고, 진동이 여러 조화성분을 포함한 복합진동은 실효값을 평가에 이용한다.

이 규격의 적용에 있어서 주파수가 2Hz 이하 및 300Hz 이상의 조화성분은 무시한다. 이는 2Hz 이하의 주파수영역의 진동은 강제운동으로 고려되고, 300Hz 이상의 조화성분은 structure-borne noise의 형태로 기계표면의 국부진동이며, 이들 진동은 해가 없는 것으로 경험적으로 알려져 있기 때문이다. 복합진동은 만일 진동속도의 실효값이 45mm/s



이하이면, 허용되는 것으로 간주하지만, 복합진동이 2~10Hz 및/또는 100~300Hz의 범위내의 조화성분을 포함하면, 부가적인 조건으로 총 진동변위와 총 진동가속도를 다음과 같이 고려해야 한다.

$$V_{eff} \leq 45 \text{ (mm/s)}, s < 1 \text{ (mm, peak)}, a < 4 \text{ (g, peak)}$$

여기서  $V_{eff}$ 는 진동속도의 실효값,  $s$ ,  $a$ 는 각각 진동변위 및 진동가속도이다.

## 5. MIL 규격

### 5.1 MIL-STD 167-1 : 함내 장비의 기계진동 (Type II : 내부기진 진동)

이 규격의 목적은 기계를 포함한 미해군장비의 진동에 대한 요구사항을 설정하는 것으로, 규격의 요구사항이 확인된 함내 장비는 일반적으로 함내에서 그 기능을 만족스럽게 수행하는 것으로 인정된다. 일반적으로 함내 장비의 기계진동은 다음의 3개의 영역으로 분류된다.

- 1) 환경의 진동
- 2) 내부기진으로부터 발생하는 진동(balance)
- 3) 왕복동 기계, 추진시스템 및 축계(shafting)에 관련된 진동

이 중에서 영역 3)은 MIL-STD-167-2에서 취급하며, 영역 1)과 2)는 이 규격에서 취급하고, 다음의 유형으로 구분한다.

#### 1) Type I : 환경진동

이 유형은 함내에 사용할 목적의 모든 장비 또는 해군 함정이 직면할 수 있는 환경 진동 조건을 견디어낼 수 있어야 하는 모든 장비에 적용한다.

#### 2) Type II : 내부기진 진동

이 유형은 기계적인 적응성(suitability)의 견지로부터 정숙하게 운전되어야 하는 모든 회전기계에 적용되며, 이는 소음의 견지로부터의 적응성에는 적용할 수 없고, 아울러 왕복동 기계에도 적용할 수 없다.

Type II의 평형잡이(balancing)와 진동에 대한 요구사항은 기계의 조달(procurement) 조건으로서 지정되며, 규정된 조건에 따라 설치되고 측정될 때, 잔류진동(residual vibration)의 진폭은 그림 5.1에 나타낸 값을 초과할 수 없다. 대부분의 기계에서 잔류진동은 주로 회전주파수(1차) 성분이며, 이 경우에 측정은 1차 진동만으로 평가를 제한할 수 있다. 기어, 임펠러 또는 다른 진동 기진원을 포함하는 복잡한 기계의 경우, 진동의 고차성분의 발생이 예상되며, 이 경우 측정값은 다음 중에 어느 하나를 만족하여야 한다.

- 1) 전체(overall) 진동속도는  $\pm 0.15 \text{ in/s} (\pm 3.81 \text{ mm/s})$ , 최대허용변위  $\pm 1.25 \text{ mils} (\pm 31.75 \mu\text{m})$  이하
- 2) 모든 부분의 주파수에서 변위 진폭이 그림 5.1의 레벨 이하

일반적으로 전동기, 발전기, 기어가 없는 단순 회전 장치와 같은 기계는 단지 1차성분의 기본 진동을 가지며, 기어구동장치, 내부 기어를 가지는 장치, 로터리 펌프나 압축기, 송풍기(fan과 blower)와 같은 기계는 흔히 1차 성분과 함께 고차성분을 가진다.

설치(mounting) 조건으로는 평형잡이(balancing) 후, 장치는 완전하게 조립되고, 장치의 최소 회전주파수의 1/4보다 낮은 고유진동수에서 탄성적으로 설치하여야 한다. 이를 수행하기 위해, 설치의 최소 정적 처짐(deflection)이 그림 5.2에 의해 결정되어야 한다. 그러나 처짐이 탄성요소(elastic element)의 원래 높이의 1/2을 초과할 수 없다.

측정은 터빈을 제외한 모든 기계의 진동진폭은 최대진폭의 방향에서 베어링 하우스 위에서 측정하며, 터빈은 베어링에 인접한 회전축에서 측정하고, 이 때 축은 매끄럽고(smooth), 동심(concentric)이어야 한다. 측정된 진동진폭은 그림 5.1에 보이는 한계치 이내이어야 한다.

측정조건으로는 일정속도 회전장치에서는 운전속도에서 측정하고, 변속 회전장치에서는 최대속도와 운전영역 내의 모든 위험속도에서 측정한다. 진폭과 주파수 측정은 그림 5.1에 나타낸 진폭과 주

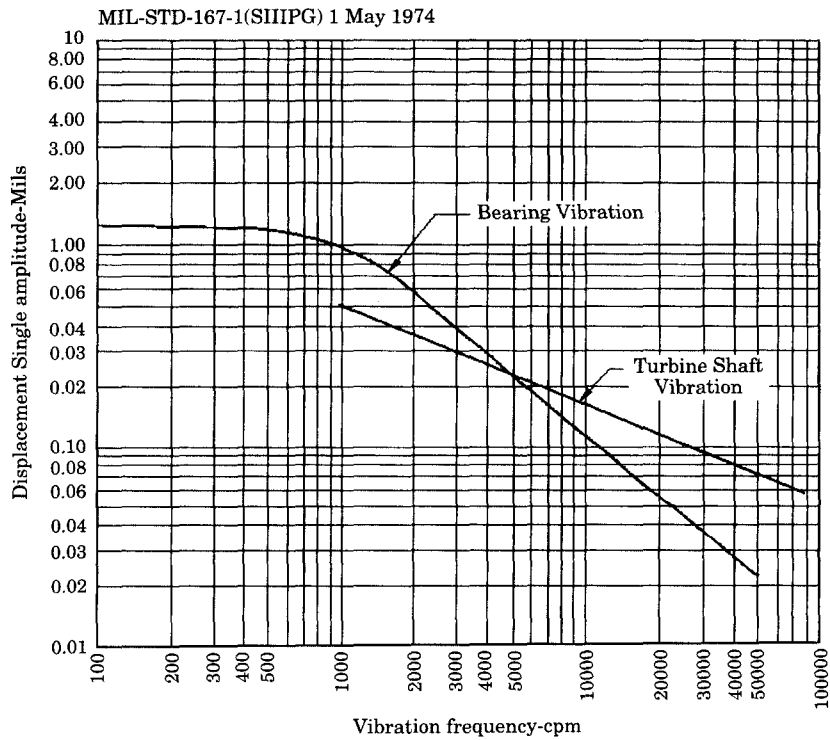


그림 5.1 최대 허용진동(MIL-STD-167-1 Type II)

과수영역과 모순되지 않는 감도(sensitivity)를 가지는 적절하게 교정된 진동측정장비(instruments)로 수행한다.

예외사항으로서 감속기어를 채용한 조립체와 같은 복잡한 기계에서는 그림 5.1에 보이는 허용진폭이 장비의 적절한 운전을 위해서는 너무 높을 수 있다. 이 경우 제작 허용오차(tolerance), 틈새(clearance) 및 운전 요구사항에 기초한 허용진폭이 사령부(command) 또는 관련된 정부기관(agency)에 의해 규정될 수 있다.

5.2 MIL-STD-740-2(1986) : 함내 장비의 Structureborne 진동가속도 측정과 허용 기준

이 규격은 MIL-STD-740B(Ships : 1965)의 대체 규격으로 함내 장비에 의해 발생하는 구조물에서 생긴 진동가속도(structureborne vibratory acceleration)의 측정, 분석 및 최대 허용레벨 판정

기준(criteria)을 위한 측정장비 및 절차를 설명한다. 측정량으로는 가속도계(accelerometer)에 의해 측정된 다음과 같이 정의되는 진동가속도의 1/3 Octave band 진동레벨로 나타낸다.

$$L_a(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left( \frac{\text{측정된 가속도}(\mu\text{m/s}^2, \text{rms})}{10(\mu\text{m/s}^2, \text{rms})} \right)$$

측정장비로는 광대역 측정장비(가속도계, 전치 증폭계(필요시), Sound level meter 또는 Vibration meter)와 1/3 Octave band 분석장비가 필요하다.

측정방법으로 장비 또는 장비의 지지구조물에 가속도계를 부착하여 측정하고, 전동기 구동 보조 기계에서 변환기의 부착은 탄성 지지점(mounting points), 가능하면 지지볼트에 가까운 부분에 설치한다. 즉, 함정에 설치 후에 장비에 소음이 발생하기 쉬운 위치에 설치한다.

기계가 정상운전 온도에 도달하도록 충분한

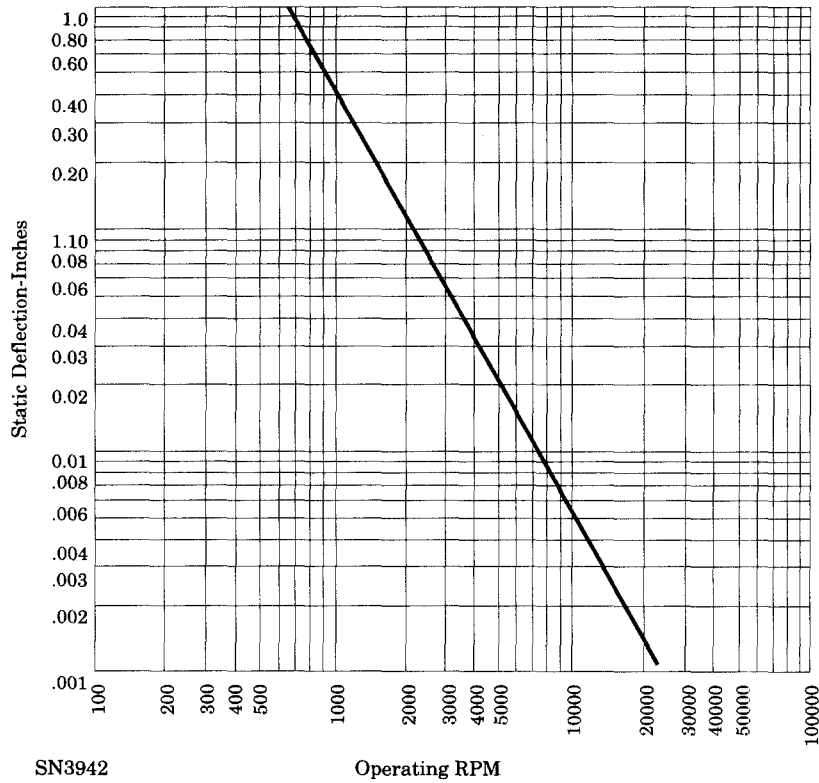


그림 5.2 Type II 진동시험에서 설치부(mounting)의 최대 정적 처짐

warmup 시간을 포함한 정상상태운전 시에 측정한다. 운전속도가 여러 개인 장비는 각 운전속도에서 측정하고, 변속운전 장비는 최대, 1/2 및 최소속도(장비가 0속도까지 감속되는 장비는 최대의 5%) 및 전 운전범위에 대해 정밀검사한다. 아울러 장비가 구성품으로 펌프 또는 웬을 가지는 경우, 이들 구성품은 측정 동안에 운전되어야 한다.

측정위치로는 주 위치(primary location)와 부가적인 위치로 다음과 같이 구분된다.

1) 주 위치

가속도계는 다음과 같이 선택된 기부(feet) 또는 플랜지 위치 위의 블록에 부착한다.

(1) 동종의 첫 품목시험의 경우

기부를 가지는 장비는 단순 및 복합 마운트 장비 모두 기부 위에서 측정하며, 단순 및 복합 마운트 장비 모두 모든 마운트와 절연장치(isolator) 위,

즉 장치의 기부 또는 베이스(base)위에서 측정한다. 장치와 가속도계 사이에는 어떠한 형태의 noise 마운트나 절연장치는 허용 되지 않는다. 벨브의 측정위치는 모든 출구 플랜지 또는 노즐 그리고 입구(inlets)를 제외한 구조적인 연결부이다. 부착점이 잘 정의되지 않은 장비의 경우에는 측정위치의 승인이 필요하다.

(2) 후속 장치 시험의 경우

최소한 가속도계는 최초 시험에서 결정된 전체적으로 가장 높은 레벨을 나타낸 위치와 대각선으로 반대 위치에서 측정한다.

2) 부가적인 위치

모든 회전장비의 경우, 그림 5.4~5.7에 나타난 부가적인 측정점에서 1/3 octave band 측정이 필요하다. 특히 모든 웬(fan)과 모터구동 펌프(pump)는 가속도계를 보조기계의 양단에 하나씩,

기계의 회전축에 수직으로 설치한다. 또한 모터구동 펌프는 회전축과 수직으로 하부 end bell에 가속도계를 부착한다. 이러한 부가적인 측정의 목적은 보수정비(maintenance)를 안내하고, 소음문제를 진단하기 위한 것으로, 장비의 승인 목적으로는 사용할 수 없다.

장비는 탄성적으로 설치(resiliently mounting)되거나 견고하게 설치(solidly mounting)된다.

탄성적으로 설치된 장비는 해군에서 승인된 탄성 마운트(resilient mount)에 의해 지지구조물로부터 절연된 장비를 말하며, 이 마운트에 의해 지지되지 않고 지지구조물에 직접 부착된 장비는 견고하게 설치된 장비로 적용을 받는다. 마운트의 승인은 Mil-M-17185, 17508, 19379, 19863 또는 21649에 따른다. 복합 마운트(compound mount)는 탄성

마운트 사이에 포함된 중간질량(intermediate mass)으로 구성되는 3개의 요소 장치를 말한다.

규정된 특정 측정위치에서 정해진 방법에 따라 측정된 1/3 octave band의 진동가속도레벨은

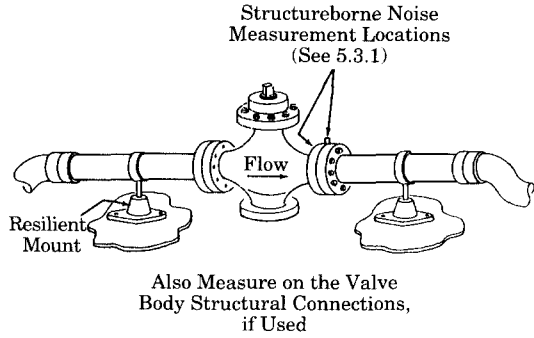


그림 5.4 밸브의 측정점 위치 (MIL-STD-740-2)

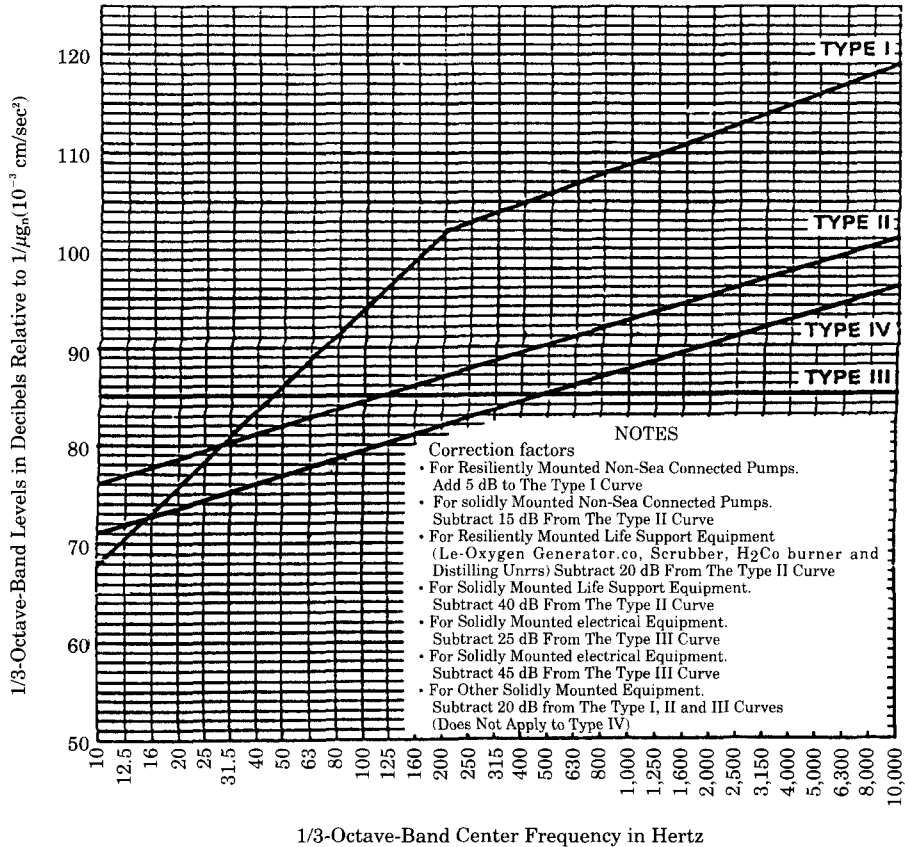


그림 5.3 Structureborne 진동가속도의 허용기준 (MIL-STD-740-2)

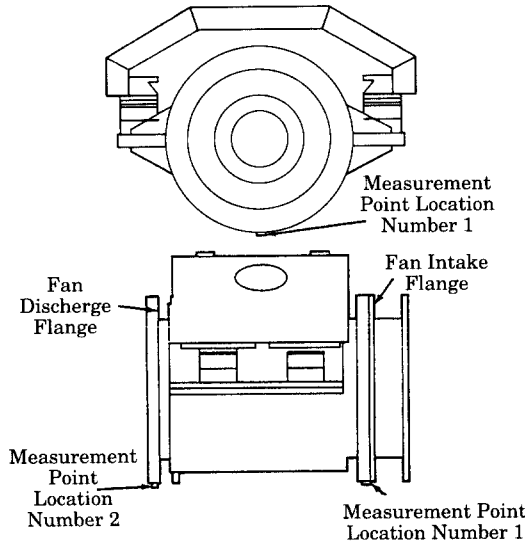


그림 5.5 축류 깃 환의 측정점 위치 (MIL-STD-740-2)

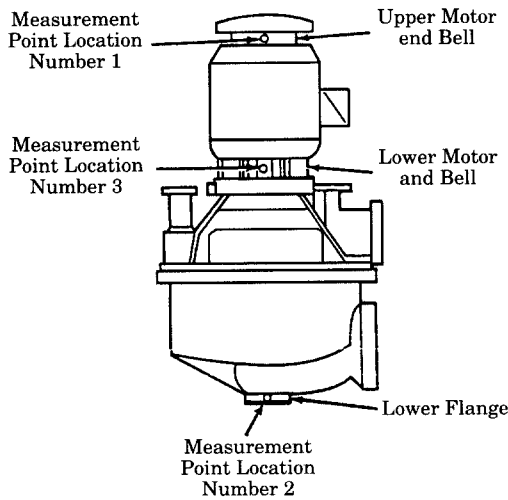


그림 5.6 모터구동 펌프의 측정점 위치 (MIL-STD-740-2)

Structureborne Noise의 허용기준(그림 5.3)과 비교하여 허용여부를 판정한다. 진동가속도의 허용 기준은 다음 4개의 그룹으로 구분된다.

- Type I : 왕복동 압축기와 내연기관
- Type II : 펌프, 밸브 및 생명유지장비 (life support equipment)
- Type III : Type I, II 및 IV 이외의 장비
- Type IV : 축류 환(fan)

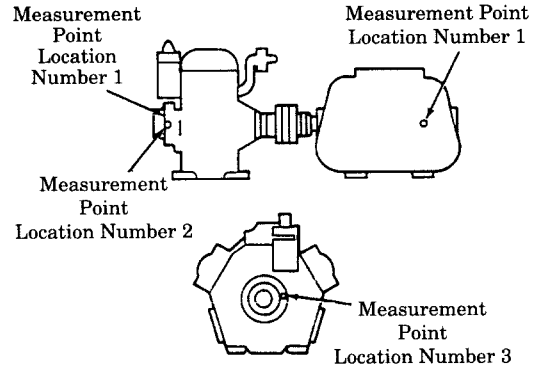


그림 5.7 모터구동 압축기의 측정점 위치 (MIL-STD-740-2)

이 허용기준은 사용조건에 따라 다음과 같이 수정계수를 고려하여 평가한다.

- 1) 해수와 직접 연결되지 않은 탄성적으로 설치된 펌프는 Type II의 허용곡선에서 5dB를 더한다.
- 2) 해수와 연결되지 않은 견고하게 설치된 펌프는 Type II의 허용기준에 15dB를 뺀다.
- 3) 탄성 지지된 생명유지장비(산소발생기, CO<sub>2</sub> scrubber, H<sub>2</sub>-CO 버너 및 증류장치)는 Type II 곡선으로부터 20dB를 뺀다.
- 4) 견고하게 설치된 생명유지장비는 Type II 곡선으로부터 40dB를 뺀다.
- 5) 탄성 지지된 전기장비는 Type III 곡선으로부터 25dB를 뺀다.
- 6) 견고하게 지지된 전기장비는 Type III 곡선으로부터 45dB를 뺀다.
- 7) 견고하게 지지된 기타 장비는 Type II와 III 곡선으로부터 20dB를 뺀다. (Type IV에는 적용되지 않음)

## 6. VCI 권장치

### 6.1 선박용 기계 진동의 허용 한계치

그림 6.1은 기계의 진동상태에 대한 진동변위의 일반적인 지침(guide)을 나타낸다. 선도는 매우 양호(very good), 양호(good), 만족(satisfactory), 허용(fair), 불량(rough), 아주 불량(very rough)의 6 등급으로 구분하고, 진동수가 높을수록 허용한계

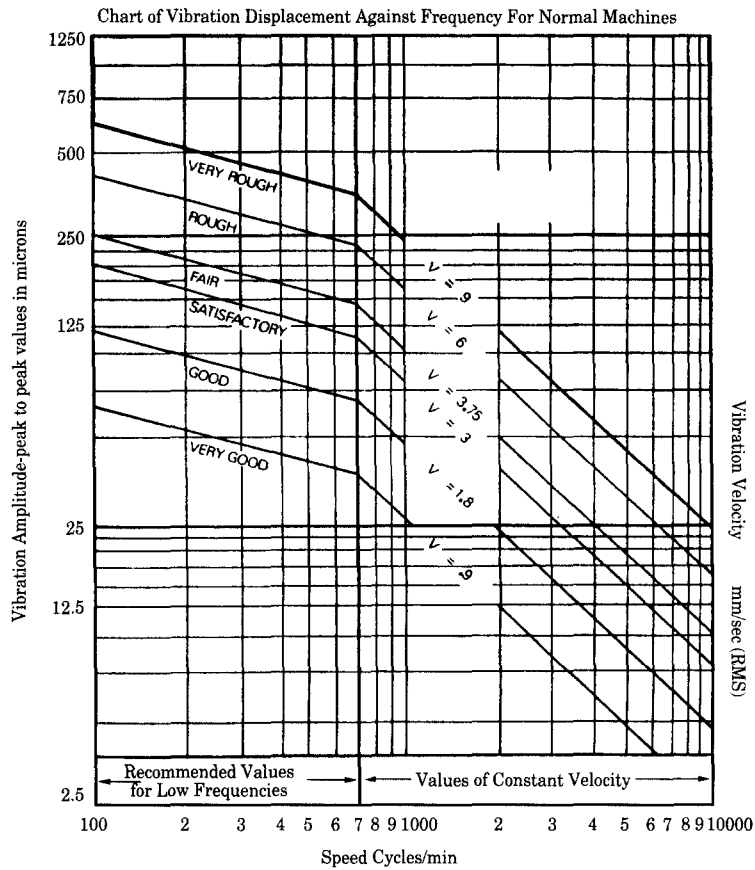


그림 6.1 변위진폭의 허용 한계치(VCI)

치가 낮게 규정하고 있다. 즉 진동수 700cpm (cycle per minute), 즉 11.67Hz를 경계로 저주파수의 권 장치와 고주파수의 일정 진동속도 구간으로 구별 하는 형식을 취하고 있다. 진동변위는 양진폭 최대 값( $\mu\text{m}$ , peak-peak), 진동속도는 실효치(mm/s, 근 치)로 나타낸다. 장시간에 걸쳐 만족스러운 운전을 보장하기 위해서는 선도에서 「만족(satisfactory)」 이하에서 운전되어야 할 것이다.

그림 6.2는 진동가속도에 기초한 구름요소베어링의 상태에 대한 지침선도이다. 이 선도는 구름베어링 이외의 저널베어링 등에는 적용할 수 없다. 이 지침은 기계의 회전속도(rpm)에 대한 진동가속도값( $g$ , peak)으로 나타내고, 3개의 영역, 즉 만족(Bearing Satisfactory), 베어링 결함(Bearing Failing), 베어링 긴급교체(Renew Bearing

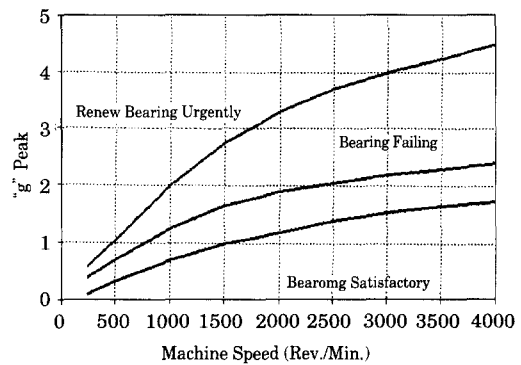


그림 6.2 베어링 진동가속도의 허용 한계치

Urgently)로 구분하고 있다.

표 6.1은 각 장비에 대한 경고치(Alert value) 및 결함치(Fault value)를 나타낸다. 이들 값은 진동속도의 경우는 실효값(mm/s, rms)으로, 진동가속

표 6.1 장비의 경고치 및 결합치(VCI)

장비 명	경고치	결합치
펌프(Pump)	4.5 mm/s, rms	9.0 mm/s, rms
	2.0 g, peak	3.5 g, peak
송풍기(Blower, Fan)	4.5 mm/s, rms	9.0 mm/s, rms
과급기(Turbocharger)	4.5 mm/s, rms	9.0 mm/s, rms
압축기(Compressor)	4.5 mm/s, rms	9.0 mm/s, rms
유분리기(Oil purifier)	2.0 g, peak	3.5 g, peak

도는 피크값(g, peak)으로 나타내고 있다.

6.2 선박플랜트에서 외부진동의 영향

기계의 배경진동(background vibration)으로서 외부로부터 기계에 전달되는 진동의 영향을 평가하기 위해 영국의 VCI사에서는 그림 6.3과 같이 프로펠러의 회전수(rpm)에 따른 진동속도의 권장레벨을 다음과 같은 3개의 지지조건

- 1) Flexibly mounted,
- 2) Semi-flexibly mounted,
- 3) Normally mounted

으로 구분하여 나타내고 있다. 권장진동레벨은 저속영역에서는 프로펠러 속도에 거의 비례하고, 선속이 증가할수록 급격히 증가하는 형태이다. 일례로 프로펠러의 속력이 90rpm이고, 기계가 기초에 유연하게 설치된(flexibly mounted) 경우, 기계의

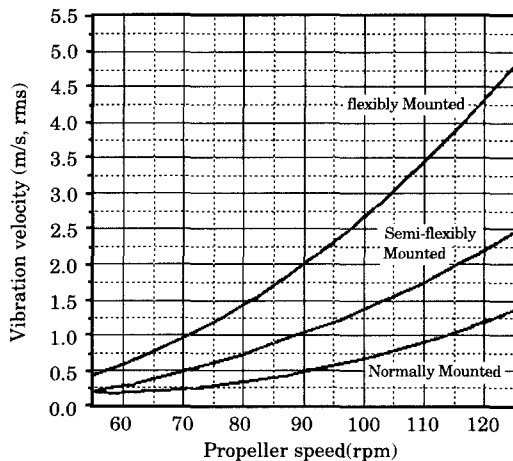


그림 6.3 외부진동의 영향

배경진동은 그림 6.3으로부터 2.0 mm/s가 되고 이 값을 기계 자신의 진동값에 더하여 평가한다. 일반적인 배경진동의 허용레벨은 프로펠러 속력에 관계없이 1.0mm/s로 규정하고 있다.

7. 각종 선급협회 지침

7.1 DNV 지침 : 진동평가를 위한 지침 (guide-lines) (Report No. 95-0421, 1995, 12)

고장수리(trouble shooting)와 일반적인 진동측정과 관련하여, 진동심각도(severity)의 평가는 중요한 작업이다. DNV(Det Norske Veritas)에서는 진동레벨을 평가할 때, 통상 국제규격과 실제 측정 경험을 이용하고 있다. 선박진동의 평가를 위한 중요한 3가지 이유로는

- 1) 진동이 선원과 승객에게 피로움과 불편함을 줄 수 있다
- 2) 진동은 선박 내의 중요 구조요소에 피로손상의 원인이 될 수 있다.
- 3) 진동은 중요 기계와 장비의 적절한 기능을 심각하게 약화시킬 수 있다.

여기에 제시하는 권장기준은 DNV의 수많은 경험뿐만 아니라, 세계적으로 이용될 수 있는 평가기준에 기초하여 Veritas Marine Services의 소음진동그룹이 기계진동 뿐만 아니라 인간의 안락함을 위한 진동지침으로 제정한 것이다.

측정은 일반적으로 통상 평가될 수 있는 노출된 부분에서 실시한다. 베어링 하우징의 진동을 합리적으로 표시하고, 어떤 국부적인 공진(local resonances)을 포함하지 않는 것을 보장할 수 있도록 주의해야 한다. 진동측정의 위치와 방향은 기계의 동적인 힘에 대한 적절한 감도를 제공하여야 한다.

기계진동은 축계(shafting)와 기계(machinery)로 구분하여 지침을 제공하고 있다. 기준은 권장되는 진동레벨의 한계치 및 손상이 발생할 수 있는 진동레벨의 한계치를 주파수범위에 대해 변위, 속도 또는 가속도의 편진폭 최대값(peak)으로 각각 제공하고 있다. 만일 실효치(rms치, root mean

square)가 측정되었다면, 각 주파수 성분은 를 곱하면 피크진폭으로 변환될 수 있다.

7.1.1 축계(shafting)

1) 축 중심선(shaft line)

축계의 종진동, 휘돌림진동 및 비틀림진동은 선박의 분류(classification)를 위한 DNV 규칙에 설명되어 있다. 여기서는 선내 기계류의 상태감시 및 진단부분에 초점을 맞추고 있으므로 이 부분은 설명을 생략한다.

2) 축 중심선 베어링(shaft line bearings)

표 7.1은 선미관(stern tube)를 포함한 축 중심선 베어링에 대한 기준을 보인다. 진동의 측정은 축중심 높이에서 베어링 하우징 위에서 수직방향 뿐만 아니라 수평방향으로 측정한다.

표 7.1 축 중심선 베어링(선미관 포함)의 권장 진동기준

구분	진동 한계치
진동레벨	변위 0.4mm p (1.0 ~ 2.0Hz)
	속도 5mm/s p (2.0 ~ 100Hz)
손상레벨	변위 0.8mm p (1.0 ~ 2.0Hz)
	속도 10mm/s p (2.0 ~ 100Hz)

7.1.2 기계(machinery)

기계와 장비의 오작동(malfunction)은 흔히 진동에 기인한다. 진동에 관한 지침을 적용할 때, 기계와 장비의 진동은 통상 다음의 두 영역으로 구분된다.

- 1) 기계나 장비 내의 기진원에 의해 여기되는 진동 (내부기진 진동)
- 2) 외부 기진원으로부터 기계나 장비에 전달되는 진동 (외부기진 진동)

DNV에서 제시하는 진동기준은 ISO를 비롯한 국제규격과 제작사 규격 그리고 많은 선박진동측정 경험에 기초하여 작성되었다. 측정은 정상운전 온도에서 실시하고, 아래에 주어지는 평가기준은 운전상태가 안정하게 제공되는 모든 운전속도와 부하에서 적용된다.

1) 대구경 기관(large bore engines)

진동 한계치를 표 7.2에 나타낸다. 기준은 내부

및 외부기진 진동의 경우, A 프레임(frame) 상부위의 선수(fore)와 선미(aft)에서 측정된 진동에 적용된다. 진동 한계치는 횡방향보다 수직 및 종방향이 더욱 엄한 것을 알 수 있다.

표 7.2 대구경 기관의 권장 진동기준

구분	진동 한계치	
	횡방향	수직 및 종방향
진동레벨	변위 1.0mm p (1.0 ~ 2.4Hz)	0.5mm p (1.0 ~ 2.4Hz)
	속도 15mm/s p (2.4 ~ 100Hz)	8mm/s p (2.4 ~ 100Hz)
손상레벨	변위 2.0mm p (1.0 ~ 2.4Hz)	1.0mm p (1.0 ~ 2.4Hz)
	속도 30mm/s p (2.4 ~ 53.1Hz)	15mm/s p (2.4 ~ 100Hz)
	가속도 10m/s <sup>2</sup> p (53.1 ~ 100Hz)	

2) 중속 기관(medium speed engine)

강(rigid) 및 탄성적으로 설치된 기관 모두에 적용되며, 표 7.3에 진동한계치를 나타낸다. 이 기준은 내부 및 외부기진 진동 모두에 대해 실린더 높이의 기관 상부의 선수 및 선미위치에서 측정된 진동에 적용된다.

표 7.3 중속 기관의 권장 진동기준

구분	진동 한계치
진동레벨	변위 0.5mm p (1 ~ 4.8Hz)
	속도 15mm/s p (4.8 ~ 100Hz)
손상레벨	변위 1.0mm p (1 ~ 4.8Hz)
	속도 30mm/s p (4.8 ~ 53.1Hz)
	가속도 10m/s <sup>2</sup> p (53.1 ~ 100Hz)

3) 중·저속기관 과급기(turbochargers)

과급기는 표 7.4에 보이듯이 높은 진동이 허용된다. 제작자는 통상 0.5×10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup> mm/s<sup>2</sup> 범위내의 높은 진동레벨을 허용하고 있으나, DNV에서는 터빈과 연결된 공기관, 배기관 등에 대한 유해한 영향을 피하기 위해, 권장진동레벨을 다소 엄격하게 정하고 있다.



표 7.4 중·저속기관 과급기의 권장 진동기준

구 분		진동 한계치
진동레벨	변 위	1.0mm p (3.0~4.8Hz)
	속 도	30mm/s p (4.8~26.5Hz)
	가속도	5m/s <sup>2</sup> p (26.5~300Hz)
손상레벨	변 위	2.0mm p (3.0~4.8Hz)
	속 도	60mm/s p (4.8~26.5Hz)
	가속도	10m/s <sup>2</sup> p (26.5~300Hz)

4) 디젤 구동 발전기(Diesel driven generators)

전체로서 장치를 고려할 때, 장치내의 기진원에 의해 여기되는 전체(overall) 진동레벨은 주기관으로부터 여기되는 진동이 지배적이고, 회전대칭물체인 발전기의 자체 내에서 발생하는 진동은 낮은 레벨이다. 선박용 발전기는 디젤구동에 의해 부가되는 진동과 주기관 및 프로펠러 기진진동과 같은 외부기진원의 진동에도 견딜 수 있어야 한다. 이들 요소를 고려한 진동기준이 표 7.5에 제시되고 있다. 발전기의 선수와 선미 베어링에서 측정하고, 강 및 탄성적으로 설치된 경우에 적용된다.

표 7.5 디젤기관 구동 발전기의 권장 진동기준

구 분		진동 한계치
진동레벨	변 위	0.5mm p (1.0~3.2Hz)
	속 도	10mm/s p (3.2~100Hz)
손상레벨	변 위	1.0mm p (1.0~3.2Hz)
	속 도	20mm/s p (3.2~79.6Hz)
	가속도	10m/s <sup>2</sup> p (79.6~100Hz)

5) 터빈구동 발전기(turbine driven generators)

발전기는 그 자체 내에서 낮은 진동을 발생하고, 역시 회전대칭인 터빈도 동일하게 적용된다. 따라서 내부기진 진동의 경우에 주어지는 다음의 기준은 터빈구동발전기 뿐만 아니라, 터빈의 경우에도 타당하다. 부가적으로 프로펠러로부터의 외부기진 진동을 평가할 때에도 동일한 한계치의 사용이 역시 권장된다. 표 7.6은 강하게 설치된(rigidly mounted) 경우와 탄성적으로 설치된(elastically mounted) 경우의 지침을 나타낸다.

표 7.6 터빈구동 발전기의 권장 진동기준

구 분		진동 한계치	
		강 지지	탄성 지지
진동레벨	변위	0.4mm p (1.0~2.0Hz)	0.5mm p (1.0~3.2Hz)
	속도	5mm/s p (2.0~100Hz)	10mm/s p (3.2~79.6Hz)
	가속도		10m/s <sup>2</sup> p (79.6~100Hz)
손상레벨	변위	0.8mm p (1.0~2.0Hz)	1.0mm p (1.0~2.4Hz)
	속도	10mm/s p (2.0~100Hz)	15mm/s p (2.4~100Hz)

6) 터빈(turbines)

터빈에 적용될 수 있는 권장진동기준을 표 7.7에 나타내었다. 이는 강 및 탄성적으로 설치된 장치에 사용되고, 베어링에서 측정된 외부 및 내부기진 진동 모두의 진동레벨로 적용될 수 있다.

표 7.7 터빈의 권장 진동기준

구 분	진동 한계치
진동레벨	5mm/s p (5~1,000Hz)
손상레벨	10mm/s p (5~1,000Hz)

7) 기어(gears)

기어에 대한 적절한 진동기준을 표 7.8에 나타낸다. 진동레벨은 베어링에서 측정된 외부 및 내부기진 진동에 모두 적용된다.

표 7.8 기어의 권장 진동기준

구 분	진동 한계치
진동레벨	5mm/s p (5~1,000Hz)
손상레벨	10mm/s p (5~1,000Hz)

8) 전동기(electrical motors), 펌프(pumps), 분리기(separators) 및 팬(fans)

표 7.9에 나타낸 내부기진과 외부기진에 대한 기준은 1) 전동기, 2) 연료 및 윤활유 분리기, 3) 유압 원심펌프(hydraulic centrifugal pumps), 4) 원심 및 로터리 스크류펌프(screw pump)(높이 2m까지

표 7.9 전동기, 펌프, 분리기 및 팬의 권장 진동기준

구 분		진동 한계치	
		횡방향	수직 및 종방향
진동레벨	변위	0.4mm p (1.0~2.0Hz)	0.5mm p (1.0~2.4Hz)
	속도	5mm/s p (2.0~100Hz)	8mm/s p (2.4~100Hz)
손상레벨	변위	0.8mm p (1.0~2.0Hz)	1.0mm p (1.0~2.4Hz)
	속도	30mm/s p (2.0~100Hz)	15mm/s p (2.4~100Hz)

의 수직펌프, 수평펌프), 5) 팬(fans)과 같은 기계 유형에 적용할 수 있다.

9) 스크류 압축기(screw compressors)

표 7.10의 진동기준은 고정 설치와 탄성적으로 설치된 스크류형의 압축기의 내부 및 외부기진 진동에 대해 제시된다. 진동측정은 수평으로 설치된 경우는 베어링 하우스와 베어링 지지대(pedestals), 수직 또는 경사지게 설치된 기계는 최대값이 기록되는 위치에서 측정하도록 하고 있다.

표 7.10 스크류 압축기의 권장 진동기준

구 분		진동 한계치	
		횡방향	수직 및 종방향
진동레벨	변위	0.4mm p (1.0~2.0Hz)	0.5mm p (1.0~3.2Hz)
	속도	5mm/s p (2.0~100Hz)	10mm/s p (3.2~100Hz)
손상레벨	변위	0.8mm p (1.0~2.0Hz)	1.0mm p (1.0~3.2Hz)
	속도	10mm/s p (2.0~100Hz)	20mm/s p (3.2~79.6Hz)
	가속도		10m/s <sup>2</sup> p p (79.6~100Hz)

10) 왕복동 압축기(reciprocating compressors)

강 지지 및 탄성 지지된 압축기에 적용되며, 비교적 높은 진동레벨을 허용하고 있다. 진동측정은 수평으로 설치된 경우는 베어링 하우스와 베어링 지지대(pedestals), 수직 또는 경사지게 설치된 기계는 최대값이 기록되는 위치에서 측정하도록 하

표 7.11 왕복동 압축기의 권장 진동기준

구 분		진동 한계치
진동레벨	변위	0.5mm p (1.0~3.2Hz)
	속도	15mm/s p (3.2~100Hz)
손상레벨	변위	1.0mm p (1.0~4.8Hz)
	속도	30mm/s p (4.8~53.1Hz)
	가속도	10m/s <sup>2</sup> p (53.1~100Hz)

고 있다.

11) 보일러(boilers)

보일러에 대해 권장되는 진동기준으로는 다음 표 7.12와 같다. 이 기준은 기중용 고리(lifting ears) 및 파이프/플랜지 연결부(connections)와 같이 강한(stiff) 위치에서 측정된 진동에 유효하다.

표 7.12 보일러의 권장 진동기준

구 분		진동 한계치
진동레벨	변위	1.0mm p (1.0~4.8Hz)
	속도	30mm/s p (4.8~100Hz)
손상레벨	변위	2.0mm p (1.0~4.8Hz)
	속도	60mm/s p (4.8~100Hz)

12) 소각로(incinerators)

소각로 내부의 콘크리트 구조물의 느슨함(loosening)과 크랙(cracks)을 피하기 위해, DNV의 경험에 따라 다음과 같이 기준을 정하고 있다. 진동은 소각로 강 구조물(steel structure)의 상부와 하부에서 직교방향으로 특정 위치에서 측정된다.

표 7.13 소각로의 권장 진동기준

구 분		진동 한계치
진동레벨	변위	0.5mm p (1.0~3.2Hz)
	속도	10mm/s p (3.2~100Hz)
손상레벨	변위	1.0mm p (1.0~3.2Hz)
	속도	20mm/s p (3.2~79.6Hz)
	가속도	10m/s <sup>2</sup> p (79.6~100Hz)

표 7.14 허용진동레벨과 허용손상레벨의 비교(DNV)

장 비 명		허용진동레벨			허용손상레벨		
		변위 (mm, p)	속도 (mm/s, p)	가속도 (m <sup>2</sup> /s, p)	변위 (mm, p)	속도 (mm/s, p)	가속도 (m <sup>2</sup> /s, p)
대구경 기관	횡방향	1.0 (1~2.4Hz)	15 (2.4~100Hz)		2.0 (1~2.4Hz)	30 (2.4~53.1Hz)	10 (53.1~100Hz)
	수직, 종방향	0.5 (1~2.4Hz)	8 (1~2.4Hz)		1.0 (2.4~100Hz)	15 (2.4~100Hz)	
중속기관		0.5 (1~4.8Hz)	15 (4.8~100Hz)		1.0 (1~4.8Hz)	30 (4.8~53.1Hz)	10 (53.1~100Hz)
중저속기관 과급기		1.0 (3~4.8Hz)	30 (4.8~26.5Hz)	5 (26.5~300Hz)	2.0 (3~4.8Hz)	60 (4.8~26.5Hz)	10 (26.5~300Hz)
디젤구동 발전기		0.5 (1~3.2Hz)	10 (3.2~100Hz)		1.0 (1~3.2Hz)	20 (3.2~79.6Hz)	10 (79.6~100Hz)
터빈구동 발전기	강 지지	0.4 (1~2Hz)	5 (2~100Hz)		0.8 (1~2Hz)	10 (2~100Hz)	
	탄성 지지	0.5 (1~3.2Hz)	10 (3.2~79.6Hz)	10 (79.6~100Hz)	1.0 (1~2.4Hz)	15 (2.4~100Hz)	
터빈		5 (5~1,000Hz)			10 (5~1,000Hz)		
기어		5 (5~1,000Hz)			10 (5~1,000Hz)		
전동기펌프 분리기 팬	내부 기진	0.4 (1~2Hz)	5 (2~100Hz)		0.8 (1~2Hz)	10 (2~100Hz)	
	외부 기진	0.5 (1~2.4Hz)	8 (2.4~100Hz)		1.0 (1~2.4Hz)	15 (2.4~100Hz)	
스크류 압축기	강 지지	0.4 (1~2Hz)	5 (2~100Hz)		0.8 (1~2Hz)	10 (2~100Hz)	
	탄성 지지	0.5 (1~3.2Hz)	10 (3.2~100Hz)		1.0 (1~3.2Hz)	20 (3.2~79.6Hz)	10 (79.6~100Hz)
왕복동 압축기		0.5 (1~3.2Hz)	15 (3.2~100Hz)		1.0 (1~4.8Hz)	30 (4.8~53.1Hz)	10 (53.1~100Hz)
보일러		1.0 (1~4.8Hz)	30 (4.8~100Hz)		2.0 (1~4.8Hz)	60 (4.8~100Hz)	
소각로		0.5 (1~3.2Hz)	10 (3.2~100Hz)		1.0 (1~3.2Hz)	20 (3.2~79.6Hz)	10 (79.6~100Hz)

주) 괄호 내의 주파수는 사용영역 주파수를 나타낸다.

## 7.2 Lloyd 선급협회(Lloyd's Register of Shipping)

### 7.2.1 왕복동 기계(reciprocating machines)

왕복동 기계의 경우, 진동수에 대한 진동 변위, 속도 및 가속도의 피크치(peak, p)로 나타낸 진동 레벨선도(그림 7.18)를 제시하고 있다. 이 선도는 DNV와 같은 형태인 권장 진동레벨과 손상레벨로 구별하고 있다. 참고로 DNV의 왕복동 압축기에 대한 지침(표 7.11)과 비교하여 표 7.15에 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 진동레벨의 허용변위를 제외하고는 비교적 진동한계치가 DNV보다 느슨하게 제시되고 있다.

표 7.15 왕복동 기계의 권장 진동기준

구 분		진동 한계치	
		강 지지	탄성 지지
진동레벨	변위	0.35mm p (2.0~12Hz)	0.5mm p (1.0~3.2Hz)
	속도	25mm/s p (12~250Hz)	15mm/s p (3.2~100Hz)
손상레벨	변위	1.0mm p (1.0~12Hz)	1.0mm p (1.0~4.8Hz)
	속도	70mm/s p (12~100Hz)	30mm/s p (4.8~53.1Hz)
	가속도	40m/s <sup>2</sup> p (100~250Hz)	10m/s <sup>2</sup> p (53.1~100Hz)

7.2.2 회전기계(rotating machines)

회전기계의 진동평가를 위해 표 7.16과 같이 진동속도의 실효치(rms치)로 표시된 진동심각도(severity)를 강지지(rigid supports)와 유연지지(flexible supports)로 구별하여 양호(good), 만족(satisfactory), 불만족(unsatisfactory), 과대(excessive)의 4개 영역으로 나타내고 있다

7.3 USSR 권장기술표준: Acceptable limits of vibration for sea-going ships

표 7.17은 USSR(United States Shipping Register)에서 규정한 선박용 장비들에 대한 허용한계치(acceptable limits)의 권장 기술표준을 나타낸다. 이 표준은 선급의 감독을 받는 선박의 진

표 7.16 회전기계의 진동평가 기준(Lloyd)

평가영역	진동 심각도 (mm/s, rms)	
	Rigid Supports	Flexible Supports
양호(Good)	2	3
만족(Satisfactory)	5	17
불만족(Unsatisfactory)	11	18
과대(Excessive)		

표 7.17 허용진동진폭(USSR)

기계 및 장비명	진동방향	진동주파수 범위cpm[Hz]	허용진동편진폭(mm)	비고
가스터빈, 감속기어(감속 기어 및 터빈 베어링 상부) 및 터빈과 디젤장치 스톱스트 베어링(상부)	V, T, L	$f \leq 850\text{cpm}[14\text{Hz}]$	0.35	프로펠러 회전수의 배수주파수를 갖는 진동의 경우 (main hullvibration)
		$f > 850\text{cpm}[14\text{Hz}]$	$0.25 \times 106/N^2$	
보조기계, 열교환기	V, T, L	탄성 pads 위에 미설치	0.25	
		탄성 pads 위에 설치	0.50	
프로펠러와 중간축	V, T	$f \leq 1,500\text{cpm}[25\text{Hz}]$	$0.5 \sim 2.8N \times 10^{-4}$	
탄성 pads 위에 설치 되지 않은 주디젤기관(기관상부)	V, T, L	$f \leq 1,000\text{cpm}[17\text{Hz}]$	0.50	
		$f > 1,000\text{cpm}[17\text{Hz}]$	$0.50 \times 10^6/N^2$	
탄성 pads 위에 설치된 내연기관(기관상부)	V, T, L	$f \leq 1,000\text{cpm}[17\text{Hz}]$	0.3	
		$f > 1,000\text{cpm}[17\text{Hz}]$	$300/N$	
탄성 pads위에 설치되지 않은 rotor형의 기계(기계의 상부)	V, T	$f = 400 \sim 2,000\text{cpm}$	$0.2 \sim 6.5 \times 10^{-5}N$	
		$f > 2,000\text{cpm}$	$0.28 \times 10^6/N^2$	

주) 1. V: 수직진동, T: 수평 횡진동, L: 수평 종진동

2. 탄성 pads 위에 설치된 기계와 장비의 경우, 이들 pads의 변동 변형진폭은 선급에 의해 승인된 허용치를 초과하지 않아야 한다.

3. 진동 주파수의 범위는 단 30cpm[0.5Hz]부터 지정된다.

동에 관한 규격으로, 축계의 비틀림진동에 대한 허용한계는 VII편(Machinery Installations)의 4절에 별도로 제시하고 있다.

8. ISO 규격

8.1 ISO 10816 시리즈; 기계적 진동-비회전부의 측정에 의한 기계진동의 평가

ISO 10816의 제 1판은 기존 베어링진동의 평가 규격으로 널리 사용되던 ISO 2372(1974년)와 ISO 3945(1985년)에 대체되어 확대 제정되었다. 이 국제규격은 다음과 같이 6편(part)으로 구성되어 있다.

제 1편: 일반적인 지침

제 2편: 50MW를 초과하는 대형육상 증기터빈·발전기세트

제 3편: 현장 측정시의 15kW이상의 정격출력과 120rpm에서 15,000rpm 사이의 정격속도를 가지는 산업용기계

제 4편: 항공기추진을 제외한 가스터빈 구동세트

제 5편: 수력발전 및 양수플랜트의 기계세트

표 8.1 각종 산업용 기계 (ISO 10816/3)

지지분류	영역경계	진동변위( $\mu\text{m}$ , rms)				진동속도(mm/s, rms)			
		그룹 1	그룹 2	그룹 3	그룹 4	그룹 1	그룹 2	그룹 3	그룹 4
강 지지	A/B	29	22	18	11	2.3	1.4	2.3	1.4
	B/C	57	45	36	22	4.5	2.8	4.5	2.8
	C/D	90	71	57	36	7.1	4.5	7.1	4.5
유연 지지	A/B	45	37	28	18	3.5	2.3	3.5	2.3
	B/C	90	71	57	36	7.1	4.5	7.1	4.5
	C/D	140	113	90	56	11.0	7.1	11.0	7.1

Group 1 : 대형기계 (300kW~50MW), 전기기계 (축 높이 H=315mm이상)

Group 2 : 중형기계 (15~300kW), 전기기계 (160≤H≤315mm)

Group 3 : 원심, 혼류 또는 축류펌프 (15kW이상, 분리된 구동장치)

Group 4 : 원심, 혼류 또는 축류펌프 (15kW이상, 연결된 구동장치)

제 6편 : 100kW이상의 정격출력을 가지는 왕복 동 기계

이 중에서 제 1편인 ISO 10816/1은 베어링하우징과 같은 비회전부에서 측정된 기계진동의 측정과 평가를 위한 일반적인 지침은 제공하고, 제 2편부터 6편까지는 각종 기계들에 대한 평가기준과 평가방법을 규정하고 있다.

평가기준은 운전감시(operational monitoring)와 승인시험(acceptance test) 모두에 관계되며, 단지 기계자체에 의해 발생하는 진동에만 적용되며, 외부에서 전달되는 진동은 포함하지 않는다. 2개의 평가기준이 다양한 종류의 기계에 대한 진동심각도를 평가하기 위해 사용된다.

즉, 평가기준으로는 측정된 광대역 진동의 크기(magnitude)와 진동크기의 변화이고, 부가적으로 운전한계(operational limits)가 제공되고 있다. 또한 ISO 10816과 ISO 7919 규격이 모두 적용된다면, 이 중 일반적으로 보다 엄격한 규격을 적용하도록 하고 있다.

여기에서는 선박용 회전기계에 적용될 수 있는 ISO 10816/3(산업용 기계), ISO 10816/4(가스터빈)과 ISO 10816/6(왕복동 기계)만을 설명한다.

8.1.1 진동크기

그림 3.1과 같이 베어링하우징 또는 베어링 지지대에서 측정된 최대 진동속도  $v_{rms}$ (mm/s)의 크기

는 경험에 의해 확립된 다음의 4개의 평가영역으로 나누어져 있다.

영역 A : 양호

영역 B : 장시간 운전 허용

영역 C : 제한된 기간동안 운전허용(보수조치가 필요)

영역 D : 허용불가

이들 영역의 경계에 대한 추천값은 대상기계에 따라 다음과 같이 다르게 설정되어 있다.

1) 산업용 기계(ISO 10816/3)

이 규격은 출력 15kW이상, 운전속도 120~15,000rpm사이의 산업용 기계장치의 진동평가에 적용된다. 구체적으로는 50MW까지의 증기터빈, 1,500rpm이하 또는 3,600rpm이상의 속도를 갖는 50MW이상의 고속 증기터빈, 3MW이하의 산업용터빈, 원심압축기, 원심, 사류 및 축류 펌프, 발전기, 모든 전동기, 송풍기 및 팬(fan)에 적용된다.

이들 값은 정격속도 또는 특정속도 영역내의 정상상태 운전조건하에서 모든 베어링, 베어링 지지대 또는 기계의 하우징 부에서의 반경방향 진동과, 스톱베어링 상에서 축방향 진동의 측정에 적용한다. 기계가 과도상태(즉, 속도 또는 하중이 변할 때)에 있을 때에는 이들 값을 적용할 수 없다. 다른 값 그리고 높은 값이 특수한 기계 또는 특별

한 지지나 운전조건에 대해 허용될 수 있을 것이다. 이런 모든 경우들은 제작자와 고객사이의 합의에 맡겨진다.

2) 가스터빈(ISO 10816/4)

이 규격은 출력 3MW이상이고, 부하상태에서 속도범위가 3,000~20,000rpm사이에서 구동되는 대용량(heavy duty) 가스터빈과 피동장치에 모두 적용된다. 항공기용 가스터빈은 이 규격에서 제외되고, 3MW이하의 가스터빈은 ISO 10816/3의 적용을 받는다

이들 값은 정격운전속도에서 정상 운전조건하에서 모든 베어링하우징 또는 지지대의 반경방향의 진동측정에 사용해야 한다. 또한 축방향의 스톱스트 베어링이 설치된 하우징의 축중심선에서 축진동에 적용한다.

표 8.2 가스터빈 (ISO 10816/4)

축 회전속도 (rpm)	영역 경계		
	A/B	B/C	C/D
3,000~20,000	4.5mm/s	9.3mm/s	14.7mm/s

표 8.3 가스터빈 구동의 50MW이상의 발전기 (ISO 10816/2 참조)

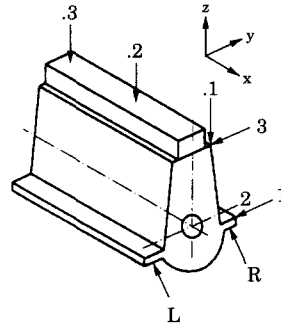
영역 경계	축 회전속도	
	1,500/1,800rpm	3,000/3,600rpm
A/B	2.8mm/s	3.8mm/s
B/C	5.3mm/s	7.5mm/s
C/D	8.5mm/s	11.8mm/s

표 8.4 가스터빈 구동의 50MW이하의 압축기와 발전기 (ISO 10816/3 참조)

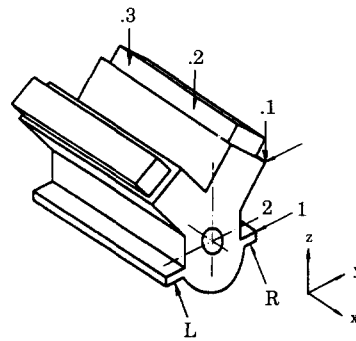
지지 분류	영역 경계	진동변위 (mm, rms)	진동속도 (mm/s, rms)
강지지	A/B	23	2.3
	B/C	57	4.5
	C/D	90	7.1
유연지지	A/B	36	3.5
	B/C	90	7.1
	C/D	140	11.0

3) 왕복 기계(ISO 10816/6 : 1995)

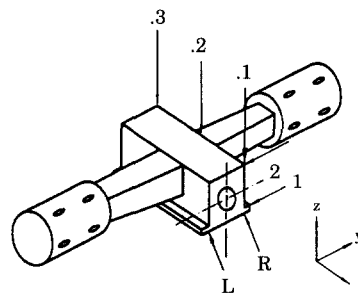
이 규격은 정격동력 100kW 이상의 강 또는 탄성적으로 지지된 왕복 피스톤기계(선박용 추진기관, 선박용 보조기관, 디젤발전기구동용 기관, 가스압축기 및 디젤전동차용 기관 등)의 운전감시와



(a) 수직 직렬 기계



(b) 다 실린더 Vee형 기계



(c) 수평 대향형 기계

그림 8.2 측정 위치의 예

표 8.5 진동 심각도 등급(2~1,000Hz) (ISO 10816/6)

진동 심각도 등급	기계구조물에서 측정된 overall 진동의 한계치		
	변위 (μm, rms)	속도 (mm/s, rms)	가속도 (m/s <sup>2</sup> , rms)
1.1	≤ 17.8	≤ 1.12	≤ 1.76
1.8	≤ 28.3	≤ 1.78	≤ 2.79
2.8	≤ 44.8	≤ 2.82	≤ 4.42
4.5	≤ 71.0	≤ 4.46	≤ 7.01
7.1	≤ 113	≤ 7.07	≤ 11.1
11	≤ 178	≤ 11.2	≤ 17.6
18	≤ 283	≤ 17.8	≤ 27.9
28	≤ 448	≤ 28.2	≤ 44.2
45	≤ 710	≤ 44.6	≤ 70.1
71	≤ 1125	≤ 70.7	≤ 111
112	≤ 1784	≤ 112	≤ 176
180	> 1784	> 112	> 176

주) 이 값들은 2~10Hz의 일정 변위, 10~250Hz의 일정 속도, 250~1,000Hz의 일정 가속도로부터 유도되었음

승인시험에 이용되며, 2~1,000Hz의 주파수범위에서 진동변위, 속도 및 가속도의 overall 실효값(rms값)으로 진동 심각도(severity)를 구분하고 있다. 이 규격은 육상 도로용 차량(트럭, 승용차, 자력추진 건설기계, 트랙터 등)에 설치된 기계에는 적용할 수 없다. 측정은 정상상태 운전조건(정상운전온도)에서 VDI 2056과 동일한 측정위치인 그림 8.2와 같은 위치에서 실시한다.

왕복기계의 주 가진주파수는 일반적으로 2~300Hz로 알려져 있으나, 보조장비를 포함한 완전한 기계를 고려할 때 적어도 2~1,000Hz의 범위가 진동 특성을 표현하는데 필요하다. 표 8.5는 진동 심각도의 등급(grade)을 12개로 구분하고 각 등급을 수치적으로 나타내고 있다. 이 등급은 기계의 주 구조물에서 측정된 변위, 속도 및 가속도의 가장 높은 overall 실효값으로, 기계의 진동심각도는 이들 3 등급 중에 가장 높은 것으로 한다. 진동심각도는 기계의 유형, 크기, 질량, 설치(mounting) 시스템의 특성, 운전조건 등에 의존한다. 그러므로 등급을 적용할 때는 관련된 주위환경과 목적을 고

표 8.6 왕복기계의 진동 분류 수(ISO 10816/6)

진동 심각도 등급	기계진동의 분류 수						
	1	2	3	4	5	6	7
평가 영역							
1.1	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B
1.8							
2.8							
4.5							
7.1	C	D	D	D	D	D	
11							
18							
28							
45	D	D	D	D	D	D	
71							
112							
180							

주)

- 왕복기계의 진동값은 일반회전기계의 경우보다 기계의 수명 동안 더욱 일정한 경향이 있다. 그러므로 이 표에서는 영역 A와 B는 결합되어 있다. 장래에 더욱 많은 경험이 축적된다면, 영역 A와 B사이를 구별하는 지침값이 제공될 수 있을 것이다.
- 분류수는 기계 유형, 적용대상, 크기, 배치, 설치조건, 운전속도에 의존. 예로 많은 산업용 및 선박용 다젤기관은 5, 6 또는 7로 분류될 것이다.

려할 필요가 있다.

### 8.1.2 진동크기의 변화

이 기준은 이전에 확립된 참고값(reference value)으로부터 진동크기의 변화에 대한 평가를 제공한다. 광대역 진동크기에서 중대한 변화가 발생할 수 있고, 이것이 영역 C에 도달하지 않았다 하더라도 어떤 조치가 필요하다. 이런 변화는 실제로 시간에 대해서 순간적이거나 점진적일 수도 있으며, 초기 손상이나 다른 어떤 비정상(irregularity)을 나타낼 수도 있다. 이는 정상상태의 운전조건하에서 발생하는 광대역 진동크기의 변화에 기초하여 제정되었다.

진동 크기의 증가나 감소가 영역 B의 상한값의 25%를 초과하면, 이 변화는 신중하게 고려되어야 한다. 그리고 진단조사를 통하여 변화에 대한 원인

을 확인하고, 앞으로 어떤 조치가 적절한 지를 결정해야 한다.

### 8.1.3 운전 한계

장기간 운전의 경우, 운전 진동한계를 설정하는 것이 일반적인 관례이다. 이들 한계는 경보(alarms)와 비상정지(trips)의 형태를 가진다.

#### 1) 경보

정해진 진동 레벨에 도달했거나, 중요한 변화가 발생했을 때에 경고(warning)를 제공하기 위한 것으로, 이때에는 보수조치(remedical action)가 필요하다. 일반적으로 경보의 상황이 발생하면, 진동 변화에 대한 이유를 알아내고 어떠한 필요한 보수 조치를 규정하기 위해 수행되는 조사 기간동안 운전을 계속할 수 있다. 경보의 설정치는 영역 B의 상한값의 1.25배로 권고된다.

#### 2) 비상정지

더 이상의 운전은 기계에 손상을 일으킬 수 있는 진동크기를 정하는 것이다. 이 비상정지레벨을 넘어서면 진동을 줄이기 위해서 즉시 조치를 취하거나, 기계를 정지(shut-down)시켜야 한다. 정상상태이지만 점진적으로 진동이 비상정지 레벨로 진행하고 있는 기계에 대한 조사를 수행하기 위해서는 그 레벨을 일정하게 하거나 또는 더 낮은 값으로 안정화시키기 위해 하중이나 속도의 감소와 같은 조치를 취해야 한다. 비상정지의 설정은 영역 C의 상한값의 1.25배로 초과하지 않도록 권고한다.

## 8.2 ISO 7919 시리즈 : 비 왕복기계의 기계적 진동-회전축의 측정과 평가기준

기계의 베어링 진동을 측정, 평가하는 ISO 10816에 대해, 이 규격은 축 위에서 진동변위를 직접 측정하는 축진동에 대한 규격으로, 축의 휘둘림 궤도, 최대진폭을 측정하는 조건과 방법, 측정치의 표시방법 그리고 평가방법과 기준을 정하고 있다. 이 규격은 다음과 같이 5편(part)으로 구성되어 있다.

#### 제 1편 : 일반적인 지침

#### 제 2편 : 대형 육상 증기터빈발전기세트

#### 제 3편 : 연결된 산업용기계

#### 제 4편 : 가스터빈 세트

#### 제 5편 : 수력발전과 양수플랜트의 기계세트

이 규격은 정상적인 운전조건하에서 각종 회전 기계의 베어링이나 또는 이에 가까운 부분에서 측정된 축진동(shaft vibration)의 평가기준을 적용하기 위한 지침으로, 기동 및 정지 또는 공진영역의 통과 등과 같은 과도상태조건에는 적용할 수 없다. 축진동 측정장비의 구조는 변환기를 축에 직접 접촉시키는 축접촉 변환기(shaft-riding transducer)와 비접촉변환기가 이용될 수 있다. 축진동 평가의 척도로는 진동변위를 채용하고 있고, ISO 7919/1에서 축 패도의 최대치  $S(p-p)_{max}$ 를 평가의 기본으로 하고 있으나, 이를 쉽게 측정할 측정계가 없으므로 앞에서 설명한 3가지 근사방법 중 하나를 대신 사용한다. 평가기준은 ISO 10816과 같이 진동크기, 진동크기의 변화 그리고 운전한계가 있으며, 진동크기를 영역 A~D로 구분하는 것과 운전 한계치 설정 등은 ISO 10816과 동일하다.

### 8.2.1 진동크기

이들 평가영역의 경계에 대한 추천값은 지금까지 측정된 경험에 근거하여 설정되었으며, 다음과 같이 기계에 따라 다르게 설정되어 있다. 선박용 회전기계와 관련이 있는 ISO 7919/3(산업용 기계)와 ISO 7919/4(가스터빈)에 대해서만 언급한다.

#### 1) 산업용 기계(ISO 7919/3)

적용 대상은 유막베어링 지지된 운전속도 1,000~30,000rpm의 연결된 산업용 기계로서, 크기와 동력의 제한이 없이 증기터빈(50MW 이하), 터보압축기, 터보펌프, 터보발전기, 터보팬 및 기타 전기구동장치 및 부속기어에 사용될 수 있다. 이는 축의 최대 상대변위가 축 회전속도  $n(rpm)$ 의 제곱근에 반비례하는 형태로 영역경계의 값  $S(p-p)$ 이 추천된다.



2) 가스터빈(ISO 7919/4)

이 규격은 유막 베어링으로 지지된 3MW이상의 출력과 3,000~30,000rpm의 회전속도를 가지는 모든 가스터빈세트 (기어 포함)에 적용된다. 단 구름요소베어링으로 지지되는 항공기용 가스터빈은

제외한다. 평가영역의 경계값은 산업용 기계(ISO 7919/3)와 동일하다.

8.2.2 진동크기 변화와 운전한계

이 규격에서도 베어링 진동의 ISO 10816과 동일하게 규정하고 있다.

표 8.7 산업용 기계와 가스터빈(ISO 7919/3, 4)

영역 경계	측의 최대 상대변위 (peak-peak, $\mu\text{m}$ )
A/B	$4,800 / \sqrt{n}$
B/C	$9,000 / \sqrt{n}$
C/D	$13,200 / \sqrt{n}$

9. 일본박용기관학회 진동권장치

1972년, 1984년 및 1998년 일본박용기관학회 기관진동연구회에서는 박용기계의 진동상황 실태를 파악함과 함께, ISO, IEC 등에서 진행되고 있

표 9.1 선박용 보조기계의 진동한계치

기종	형식	용량	표준회전수 (rpm)	진동변위 (mm, p-p)	진동속도 (mm/s, rms)			
벌류트 펌프	수직형	500m <sup>3</sup> /h이하	1800	0.04	2.67			
		500m <sup>3</sup> /h이상		0.06	4.00			
기어 펌프	수평형	500m <sup>3</sup> /h이하	3600	0.02	2.67			
		500m <sup>3</sup> /h이상		0.03	4.00			
	수직형	80m <sup>3</sup> /h이하	900~1200	0.04	1.33~1.78			
		80m <sup>3</sup> /h이상		0.05	1.66~2.23			
스크류 펌프	수직형	100m <sup>3</sup> /h이하	1200	0.04	1.78			
		100m <sup>3</sup> /h이상		0.06	2.67			
유청정기	원통형		15000	0.01	5.55			
	분리관형		5000~9000	0.015	3.33~4.44			
팬	수직형	1000m <sup>3</sup> /h이하	900~1200	0.08	2.66~3.57			
		1000m <sup>3</sup> /h이상		0.10	3.33~4.45			
	수평형	1000m <sup>3</sup> /h이하	1800	0.04	2.67			
		1000m <sup>3</sup> /h이상		0.05	3.33			
공기 압축기	5.5kW 이하	V	900	0.10	3.33			
				H	0.30	10.0		
							A	
		5.5~27kW		V			0.20	6.66
				H			0.40	13.33
				A			0.40	13.33
	27~37kW	V		0.30			10.0	
		H		0.60	20.0			
		A		0.60	20.0			
	37kW 이상	V		760~900	0.40	11.3~13.3		
					H	0.80	22.5~26.6	
								A

는 국제규격의 제정에 적극적으로 참여하기 위한 Back data로 활용할 의도로 광범위한 박용기기 이용자와 제작자의 현장진동실태조사를 실시하고, 이를 근거로 진동권장치를 제시하고 있다.

9.1 보조기계

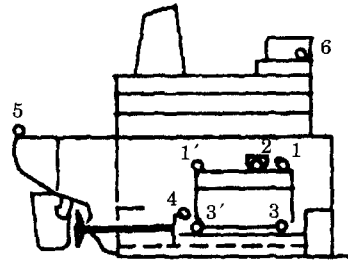
표 9.1은 선박용 보조기계로서 이용되는 펌프, 송풍기, 유청정기, 압축기 등에 대해 진동 실태조사를 바탕으로 많은 자료를 집약하여 만든 진동한계치에 대한 권장치이다.

9.2 주기 및 보기용 디젤기관

선박 주기용 디젤기관에 대해서는 기관의 출력, 회전수에 의해 데이터의 성질이 달라지기 때문에, 여기에서는 회전수를 기준으로서 200rpm 이하를 저속기관, 그 이상을 중·고속기관으로 구별하고 있다. 측정은 기관의 정격회전수 부근에서 그림 9.1에 나타내는 기관프레임 상부, 기관설치대 및 과급기 설치대에서 수행하고, 측정된 횡방향 진동

변위의 진폭(mm)과 진동속도의 실효치(rms 값)인 진동심각도(vibration severity)를 평가척도로 하고 있다.

다양한 측정자료의 분석결과로부터 bracing을 부착하지 않은 경우에는 기관프레임 상부의 횡진동에 대한 진동변위와 진동속도에 대한 판단기준으로서 표 9.2와 같이 진동제한치(vibration limits)를 제안하고 있다. 즉, 진동상태가 비교적 양호하기 위해서는 표 9.2의 진동제한치 이하가 되어야 하며, 아울러, bracing을 부착한 경우는 선체진동과의 관련도 있으므로 주의를 필요로 한다. 표 9.3과 9.4에 저속 및 중·고속 주기용 디젤기관에 대해 일본의 제작사들이 사내기준으로 사용하고 있는 진동제한치를 참고로 나타낸다.



(측정점) 1, 1': 기관프레임 상부의 전단 및 후단, 2: 과급기 설치대, 3, 3': 기관 설치대의 전단 및 후단  
(측정방향) H: 횡방향, V: 상하방향, L: 전후방향  
그림 9.1 주기용 디젤기관의 진동측정위치

표 9.2 주기 및 보기용 디젤기관의 진동제한치

구 분	주 기 용		보 기 용
	저속기관	중·고속기관	
진동변위 (mm peak)	0.5	0.35	0.1
진동속도 (mm/s peak, rms)	18	18	16

표 9.3 저속 주기용 디젤기관의 허용진폭 권장치의 사내기준(편진폭)

회사명	기관프레임상부		기관 설치대			과급기 설치대		
	횡방향	전후방향	횡방향	상하방향	전후방향	횡방향	상하방향	전후방향
A-C사	0.5mm	0.5mm						
D사	0.5mm	0.5mm				0.5mm	0.5mm	0.5mm
E사	0.5mm	0.5mm	0.3mm	0.3mm	0.3mm	0.5mm	0.5mm	0.5mm
F사	1.0mm	0.6mm				0.7g	0.7g	0.7g
G사	1.0mm	1.0mm	1.0mm	0.6mm	1.0mm	2.0mm	2.0mm	2.0mm
H사	0.2g	0.2g				1g 또는 0.5mm	1g 또는 0.5mm	1g 또는 0.5mm
I사	1.0g	1.0g				1.0g	1.0g	1.0g
J사	0.2g	0.2g						
K사	1.0mm					1.0g		

표 9.4 중 · 고속 주기용 디젤기관의 허용진폭 권장치의 사내기준(편진폭)

회사명	기관프레임상부		기관 설치대			과급기 설치대		
	횡방향	전후방향	횡방향	상하방향	전후방향	횡방향	상하방향	전후방향
A사	0.2mm	0.2mm	0.1mm	0.1mm	0.1mm	0.2mm	0.2mm	0.2mm
	0.2mm	0.2mm	0.075mm	0.075mm	0.075mm			
B사	0.075mm	0.075mm	0.05mm	0.05mm	0.05mm	0.15mm	0.15mm	0.15mm
C사	0.25mm	0.25mm	0.1mm	0.1mm	0.1mm	0.25mm	0.25mm	0.25mm
D사	0.05mm	0.05mm	0.035mm	0.035mm	0.035mm	0.075mm	0.05mm	0.05mm
E사	0.2g	0.2g	0.2g	0.2g	0.2g	2.0g	2.0g	2.0g
F사	0.25mm	0.25mm	600cpm 이하는 변위, 600cpm 이상은 속도로 규제					
	15.7mm/s	15.7mm/s						

후 기

본 자료는 수중음향특화센터(ADD)에 의해 지원된 연구과제「함정의 소음원 진단시스템 개발」의 일부로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. MIL Standard : "Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment", MIL-STD-167-1, 1974
2. MIL Standard : "Airborne Sound Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment", MIL-STD-740-1, 1986.
3. MIL Standard : "Structureborne Vibratory Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment", MIL-STD-740-2, 1986.
4. Verlin Deutscher Ingenieure : "Beurteilung der Einwirkung Mechanischer Schwingungen auf den Menschen," VDI Standard 2056, 1964.
5. Verlin Deutscher Ingenieure : "Measurement and Evaluation of Mechanical Vibrations of Reciprocating Piston Engines and Piston Compressors," VDI Standard 2063, 1985.
6. ISO Standard : "Mechanical Vibration of Non-Reciprocating Machine-Measurements on Rotating Shafts and Evaluation-," ISO/IS 7919, 1996.
7. ISO Standard : "Mechanical Vibration-Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts-," ISO/IS 10816, 1996.
8. 기관진동연구회, "박용주기 및 보기의 진동조사보고," 일본박용기관학회지, 9권 8호, 1974.
9. 진동음향연구위원회, "「최근의 박용기계의 진동·소음문제와 그 대책」양케이트 조사결과", 일본박용기관학회지, 34권 1호, 1999.
10. 양보석, "표준화에 관한 일반적인 현황," 한국소음진동공학회, 8권6호, pp.988~993, 1998
11. 양보석, "회전기계의 진동평가 및 규격," Vibration119, 1권 4호, 2권 1~3호, 나다 S&V, 2000/2001