

## 기계류부품의 가진시험 조건에 관한 연구

김형의\* · 박종원\* · 정동수\* · 강보식\*

\*한국기계연구원 신뢰성평가센터

### Study of Vibration Test Condition for Machinery Component

Hyoung-Eui KIM · Dong-Soo JUNG · Bo-Sik KANG<sup>37</sup> · Jong-Won PARK

#### Abstract

It is increasingly important to ensure that a given vibration test specification of a particular machinery component is appropriately established by considering its real environmental conditions. Vibration test standards for electrical components are well documented, for example in an IEC 60068 series, while standards for machinery components are rarely found except a few military standards. Thus many vibration tests are performed based on the military standards. However, a test based on these military standards often results in over-testing, and under-testing in some cases due to the different environmental conditions. Also, these standards require an appropriate tailoring that may not be easily accomplished. In this paper, various international and military standards are compared and investigated to obtain test specifications relevant for machinery components. Also appropriate tailoring methods are demonstrated through a case study.

Key Words : Endurance Test(내구시험), Environmental Test(환경시험), Vibration Test(진동시험) International Standard(국제규격), Military Standard(군사규격),

## 1. 서론

일반적으로 진동시험은 목적에 따라 여러 가지로 분류된다. 예를 들면, 개발 단계에서 수행하는 설계 및 제조상의 결함 분석을 위한 Development test, 제품의 품질 수준을 유지하기 위하여 수행하는 Acceptance test, 그리고 예상되는 또는 요구되는 사용 환경에서 제품의 정상적인 작동 여부를 평가하는 보증시험 (Qualification test) 등이 있다. 보증시험은 기능시험 (Functional test)과 내구시험 (Endurance Test) 두 가지로 나누어지며, 특히

환경시험의 한 부분으로 수행되는 내구시험은 제품의 전체 수명 사이클을 대표하기 때문에 매우 중요한 시험이다. 따라서, 특정한 제품의 사용 환경 및 사용 목적에 부합되도록 내구시험을 적절히 수행하여야 하며, 이를 위한 규격으로서 ISO, IEC 등과 같은 국제규격과 MIL, DEF STAN 등과 같은 군사규격이 많이 활용되고 있다. 특히 IEC 60068 Series는 전기전자 부품의 진동시험에 대하여 체계적으로 정립되어 있으며 가장 많이 인용되는 규격이다. 또한 ISO 16750 series에도 차량에 장착되는 전기전자 부품에 대한 시험방법이 잘 기술되어 있다. 그러나 기계류 부품에 대한 규격은 아직까지 체계적으로 정립되어 있지 않다. 기계류 부품과 관련된 규격으로서, 선박에 사용되는 품목에 대한 규격은 ISO 10055(1), 일반 차량용 부품에 대한 규격은 JIS D 1601(2) 등을 많이 참고하고 있으나, 대부분의 경우에는 군사규격(Military standard)을 많이 인용하고 있으며 대표적인 규격으로서 MIL-STD-810F(3)가 가장 많이 인용되고 있고 영국을 포함한 유럽에서는 DEF STAN 00-35(4)를 활용하기도 한다. 특히 MIL-STD-810F와 같은 군사규격을 적용하기 위해서는 사용 환경과 목적에 맞추어 적합화 시키는 작업인 'tailoring'이 필수적이다. Tailoring이 필요한 이유는 다음과 같은 규격이 설정되는 배경에 의하여 다소 이해될 수 있다.

초창기의 진동시험 규격은 군사규격만 있었으며, 처음 제정될 당시에 현존하는 가진기의 성능과 활용성을 고려하여 제정되었다. 초기 가진기는 기계식으로 주파수 범위 10 ~ 60 Hz 정도에서 작은 변위의 정현파 신호만 가능하였다. 따라서 이러한 기계식 가진기에 기초를 두어 규격을 설정하였다(5). 향후, 규격을 제정할 당시 사용된 여러 제약조건들을 더 이상 고려할 필요가 없게 되었으나 한번 정한 규격을 바꾸기는 매우 힘들기 때문에 계속 사용하는 경우가 많다. 대표적인 예로서, 미국 철도에 사용되는 게이지 규격이 4 feet 8.5 inch로 정해진 이유는 로마시대의 이륜전차에 사용된 게이지의 사양을 계속 사용해 왔기 때문이다. 즉, 현존하는 많은 규격들이 과거의 제약조건 때문에 현실을 제대로 반영하지 못했지만 아직까지 그대로 사용되는 부분이 많이 있으며, 이는 서로 다른 규격체(ISO, IEC, MIL 등)들이 서로 다른 규격을 제정하는 이유가 되기도 한다.

Tailoring이 필요한 또 다른 이유는 제품의 사용 환경의 다양성에 있다. 수많은 제품들이 사용되는 모든 환경조건을 고려하여 규격을 정하는 것은 불가능하기 때문이다. 따라서, MIL 규격도 1975년 개정된 MIL-STD-810C까지는 바로 적용할 수 있는 'cookbook' 형태의 규격이었으나 1983년 네 번째 개정된 MIL-STD-810D부터는 다양한 환경조건과 부품이 장착되는 부분에 따라 tailoring하여 적용하도록 개정하였다. 그리고 현재 cookbook 형태의 규격인 ISO 및 IEC 등도 점차 tailoring 방식으로 전환을 시도하고 있다. 그러나, tailoring은 실

측 데이터에 기초를 두어 이루어지기 때문에 제품에 적용시키기에는 많은 현실적인 어려움이 따른다. 예를 들면, MIL-STD-810F에는 다양한 환경조건에 적용될 수 있는 많은 방법적인 요소들은 자세히 기술되어 있으나 진동시험의 핵심사양인 시험레벨 및 시험시간은 실측 데이터와 LCEP (Life Cycle Environment Profile)에 의하여 정하도록 되어있다. 따라서, 제품이 사용되는 환경조건의 모든 데이터가 확보되거나 사용자가 원하는 특정한 수준을 제시하는 경우를 제외하면 적용하기 매우 힘든 실정이다.

제품의 신뢰성을 확보함과 동시에 사용자와 공급자 모두 만족할 수 있도록 하기 위해서는 실측데이터에 기반을 둔 진동시험 조건을 설정해야만 한다. 그러나 이는 장기적인 차원에서 접근할 수 있기 때문에 현실적으로는 바로 적용 가능한 대안이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 IEC, JIS 등과 같은 cookbook형태의 규격과 MIL-STD-810F 및 DEF STAN 00-35와 같은 tailoring 방식의 규격들을 비교 분석하여, 기계류 부품에 적용할 수 있는 시험조건을 선정하는 과정을 사례연구(case study)를 통하여 나타내었다. 사례연구를 통하여 나타낸 시험조건 선정 과정은 다양한 종류의 기계류 부품에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

## 2. 진동시험 방법의 종류

내구시험의 목적으로 사용되는 진동시험 방법은 매우 다양하며, 대표적인 시험방법으로써 정현파 고정 시험 (Sinusoidal Dwell Test), 정현파 소인 시험 (Sinusoidal Sweep Test), 광대역 랜덤 시험 (Broadband Random Test), 협대역 랜덤 시험 (Narrowband Random Test), SoR (Sine on Random) 등이 있다. 이러한 많은 방법들이 함께 사용되는 이유는 국제규격이 제정될 때의 제약조건과 무관하지 않다. 즉, 가진기의 성능과 컨트롤 시스템의 활용 여부 등에 의하여 적용 가능한 시험방법들이 결정되기 때문이다. 본 절에서는 대표적인 진동 시험 방법들에 대한 용도와 관련 규격들의 일반적인 사항 및 적용시 고려해야 하는 요소들에 대하여 간략하게 기술하였다.

군사규격에 의하면 내구시험의 경우 과거에는 기능시험에 사용되는 시험레벨보다 매우 높게 설정하여 한 측당 1시간 시험하도록 규정되었으나 현재는 실제 사용 환경의 데이터를 이용하여 등가시험시간(Equivalent test time)을 계산한 뒤 가속시험 방법을 사용하도록 하고 있다. 그리고 등가 시험시간은 다음과 같은 Miner's rule에 의하여 계산하도록 되어있

$$t_2 = t_1 \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^n \quad (1)$$

여기서,  $t_1$ 은 특정한 진동레벨에 노출된 실제 시간,  $t_2$ 는 시험레벨에서의 시험시간,  $S_1$ 은 측정된 진동레벨, 그리고  $S_2$ 는 시험시의 진동레벨이다. 단,  $S_1$ ,  $S_2$  그리고  $n$ 값은 규격에 따라 조금씩 다르게 사용되고 있기 때문에 주의를 요하고 있으며, 일반적인 재질의 경우에 대하여

Table 1에 요약하였다. Table 1에 의하면 정현파시험의 경우는 MIL-STD-810F, 랜덤시험의 경우는 DEF STAN 00-35가 보다 합리적으로 정의된 것을 알 수 있다.

Table 1 The case of general metallic materials

규격	S의 기준	n 값
MIL-STD -810F	진동스펙트럼 ( $g^2/Hz$ )	4
	사인 (peak, g)	6
DEF STAN 00-35	진동스펙트럼의 RMS	5
	진동스펙트럼 ( $g^2/Hz$ )	2.5

보다 정확한 tailoring을 위해서는 시험체의 S/N 곡선을 구해야 가능하지만 일반적인 기계류 부품의 경우에는 Table 1의 기준에 의하여 사용할 수 있을 것이다.

### 2.1 정현파 시험 (Sinusoidal Test)

정현파 시험은 주로 제품의 공진주파수를 파악하거나 내구시험에 사용되며 정현파 고정시험과 정현파 소인시험으로 나뉘어진다. 정현파 고정시험은 일정한 진동수 (주로 공진주파수)로 가진하며, 시험 전 결정되어야 할 사항으로 가진주파수, 진동레벨, 시험시간이 있다. 정현파 소인시험은 공진주파수 파악 및 내구시험에 모두 사용되며, 내구시험에 사용될 경우 결정되어야 할 사항은 소인 주파수 범위, 소인속도, 시험시간, 시험레벨 곡선이 있다. 일반적인 형태의 시험레벨 곡선은 Fig. 1과 같으며 꺾임점인 'cross-over frequency,  $f_c$ '는 식(2)에 의하여 구할 수 있다.

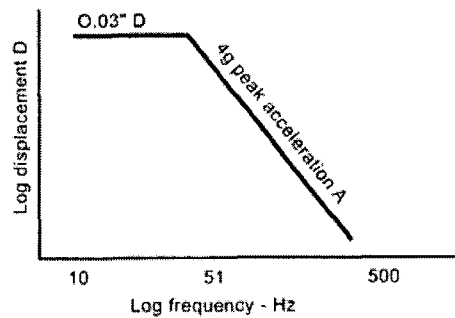


Fig. 1 Typical sinusoidal sweep test curve

$$f_c = \sqrt{\frac{\text{Acceleration level (g) at } f_c}{0.00403 \times \text{Displacement (mm) at } f_c}} \quad (2)$$

정현파 시험의 경우 주의해야 할 사항으로 대부분의 규격에서 진동레벨의 편차는 3dB이하로 유지하며 6dB를 초과하는 경우 시험을 중지하도록 되어있다. 군사규격에는 특수한 경우를 제외하면 정현파 시험은 설정되어 있지 않으며, 가장 많이 활용되고 있는 규격은 IEC 60068-2-6(6)이며 정현파 고정시험 및 소인시험에 대하여 기기별 및 부품별로 체계적으로 구성되어 있다. 이 규격은 주로 전기전자 제품에 대하여 기술하고 있으나 대형 공조기기 및 발전기 등에 대한 사항도 포함하며 부품 및 기기류에 대한 일반적인 시험방법을 나타낸 것으로서 경우에 따라서는 기계류 부품에도 적용될 수 있다. 이 외에 자동차 업계에서는 JIS D 1601을 많이 참고하고 있다. 이 규격에는 승용차, 버스, 트럭 등제품이 장착되는 대상과 엔진, 서스펜션, 차체 등 장착되는 부위별로 기준을 설정하고 있기 때문에 차량용 기계류 부품에 잘 적용될 수 있으나 랜덤시험에 대한 내용은 없기 때문에 활용성은 다소 떨어진다.

## 2.2 랜덤 시험 (Random Test)

랜덤시험은 실제환경과 유사하게 구성할 수 있기 때문에 내구성 시험 목적으로는 정현파 시험보다 더 많이 사용되고 있다. 그러나 확실적인 접근이 필요하기 때문에 시험 시 고려해야 하는 요소가 많고 시험장치의 제어시스템 구성도 까다롭다. 반드시 고려해야만 하는 중요한 요소로서, Clipping, 주파수 분해능, 통계적 정확도 (Stat DoF, Statistical degrees of freedom) 등이 있다. MIL-STD-810F규격에서는, Clipping의 경우 3 이내, 통계적 정확도는 120 DOF이상, 주파수 분해능은 25Hz이하에서는 2.5Hz이하 25Hz이상에서는 5Hz이하로 규정하고 있다.

랜덤시험은 정현파 시험과 복합적으로 구성할 수도 있으며 가장 많이 사용되는 시험 방법으로서, 광대역 랜덤시험, SoR 시험 (Sine on Random), RoR 시험 (Narrowband Random on Random) 등이 있다. 광대역 랜덤시험이 가장 일반적이며 시험레벨은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 정현파 소인시험과 유사한 곡선으로 표현되지만 단위는 g<sup>2</sup>/Hz로 나타낸다. 또한 정현파 시험과 마찬가지로 진동레벨의 편차는 3dB이하로 유지하며 6dB를 초과하는 경우 시험을 중지한다.

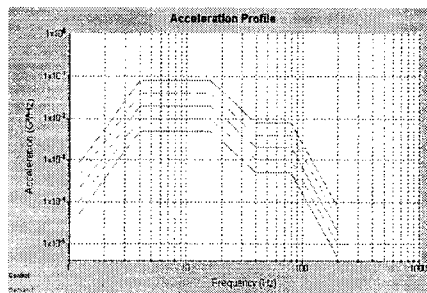


Fig. 2 Typical broadband random test curve

랜덤시험에 많이 활용되고 있는 국제규격은 IEC 60068-2-64(7)이며 주로 전기전자 제품에 적용되고 있으나, 정현파 시험의 경우와 마찬가지로 일반 기계류 부품에도 적용될 수 있으며 제품의 사용 환경에 따라 체계적으로 구성되어 있다. 그러나 이 규격은 광대역 랜덤시험

에 대한 내용만 다루고 있기 때문에 실제 사용 환경을 제대로 반영할 수 없는 경우가 발생하기도 한다. 반면, MIL-STD-810F는 각종 차량, 항공기, 선박 등의 사용 환경에 따라 적절한 시험방법을 제시하고 있기 때문에 가장 많이 인용되는 규격이다. 그러나, 기본적으로 tailoring을 전제로 한 규격이기 때문에 극히 제한적인 경우를 제외하면 자세한 시험레벨과 시험시간은 제시되어있지 않다. 따라서, 실측 데이터를 이용할 수 있는 경우에는 매우 유용하게 활용될 수 있으나 현실적으로 적용하기에는 다소 어려움이 따른다. 또 다른 군사규격인 DEF STAN 00-35는 tailoring을 전제로 한 규격이지만, 많은 부분이 국제적 합의가 된 IEC 규격들을 반영하여 제정되었기 때문에 많은 경우에 있어서 cookbook 형태의 규격도 제시하고 있다. 따라서, 실측 데이터가 없는 경우에도 약간의 가정과 IEC 60068-2-64를 참고 하면 일반적인 기계류 부품에 유용하게 적용될 수 있도록 tailoring이 가능하다.

다음 절에서는 위에서 언급한 각종 규격을 이용하여 궤도차량에 사용되는 부품에 적용할 수 있는 시험조건을 선정하는 과정을 기술하였다.

### 3. 사례연구 (Case Study)

본 절에서는 탱크, 장갑차 등과 같은 군용 궤도차량과 불도저, 굴삭기 등과같은 건설용 궤도차량에 사용되는 기계류 부품에 적용할 수 있는 시험조건을 구하는 방법을 제시하였다, 먼저 IEC 60068-2-64를 이용하는 경우 기계적 조건 등급을 구하기 위하여 IEC 60721 Series 또는 IEC TR 60721 Series를 참고하여야 한다. 이 때 off-road에서 주로 사용되는 궤도차량인 경우 IEC TR 60721-3-5(7)에 의하면 등급은 5M3이 되고 시험레벨에 대한 진동 스펙트럼과 시험시간은 Table 2에 나타낸 것과 같다.

Table 2 Test specification according to the IEC 60068-2-64 for equipments used in tracked vehicles

시험시간	10 ~ 200 Hz 구간	0.03 g <sup>2</sup> /Hz
	200 ~ 500 Hz 구간	0.01 g <sup>2</sup> /Hz
시험시간	한 축당 30분 (3축 시험)	

이 경우 진동시험의 총 RMS값은 약 2.95 g가 된다. 위 규격에 의한 진동시험은 비교적 쉽게 수행할 수 있으나 궤도차량의 중요한 특성인 트랙의 진동현상을 반영하지 못하고 있다. 반면에, MIL-STD-810F를 이용하는 경우 트랙의 진동현상을 적절히 반영할 수 있는 S-RoR 시험(Swept frequency narrowband Random on wideband Random)을 사용하도록 정하고

있으며 시험레벨 곡선 형태는 Fig. 3에 나타낸 것과 같다. 그러나 Fig. 3은 전반적인 형태만 나타낸 것으로 정확한 시험레벨은 실측 데이터를 이용하여 구하며 시험시간은 LCEP 에서 인 용하도록 정하고 있기 때문에 바로 적용하기는 힘들다.

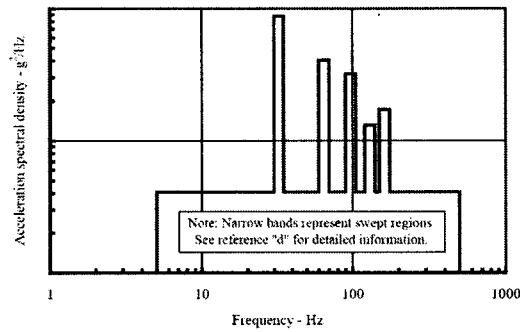


Fig. 3 Test level according to the MIL-STD-810F

다음으로, DEF STAN 00-35을 이용하면 MIL-STD-810F와 유사한 Fig. 4와 같은 S-RoR시험 레벨 곡선을 구할 수 있으며, 제품이 장착되는 궤도차량의 부위에 따라 곡선 형태와 진동레벨은 조금씩 다르게 결정된다. 본 사례연구의 경우는 제품이 궤도차량의 조종실 부근에 장착된다고 가정하였다.

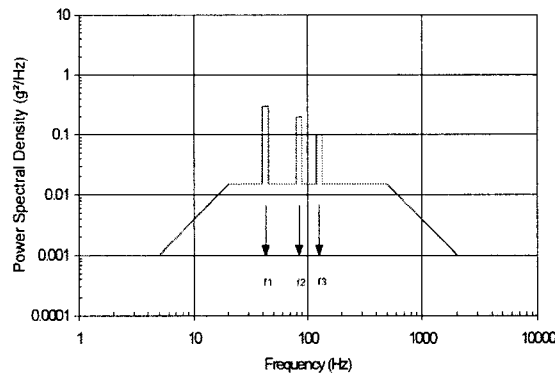


Fig. 4 Test level according to the DEF STAN 00-35

또한 이 규격에는 Table 3에 나타낸 것과 같이 각 축당 광대역 및 협대역 랜덤에 대한 자세 한 시험레벨을 구할 수 있다. 위 그림에서 f1, f2, f3의 주파수폭(bandwidth)은 각각 5Hz, 10Hz, 15Hz이고, 소인주파수 범위는 각각 20~170Hz, 40~340Hz, 60~510Hz로 설정되며, 소인속도는 1 octave/min, 소인횟수는 2회 이다. 이 경우 진동시험의 총 RMS값은 각 축 별 로 4.20 g, 3.42 g, 3.42 g가 된다. 그리고 시험시간은 한 축당 4시간으로 설정된다. 따라서,

DEF STAN 00-35에 의하여 설정하면 제품의 사용 환경이 보다 더 적절하게 고려된 시험조건을 구할 수 있음을 알 수 있다.

Table 3 Test Level according to the DEF STAN 00-35 for equipments used in tracked vehicles

a. Wideband random spectrum ( $g^2/Hz$ )				
Axis	Break points (Hz)			
	5	20	500	2000
Vertical	0.001	0.015	0.015	0.001
Transverse	0.001	0.010	0.010	0.001
Longitudinal	0.001	0.010	0.010	0.001
b. Swept narrowband random ( $g^2/Hz$ )				
Axis	Swept frequencies (Hz)			
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	
Vertical	0.30	0.20	0.10	
Transverse	0.15	0.10	0.05	
Longitudinal	0.15	0.10	0.05	

여기서, 한가지 유의해야 할 점은 DEF STAN 00-35는 군용제품을 위한 규격으로서 건설중장비 및 일반 기계류 부품에 적용하게 되면 과도시험(over-test)이 될 가능성이 크며 반대로 IEC 60068-2-64을 군용제품에 적용할 경우 부족시험(under-test)이 될 가능성이 매우 크다. 본 사례연구에서 나타낸 두 가지 규격을 비교하면 쉽게 알 수 있다. 먼저, 광대역 랜덤 시험의 주파수 범위를 비교하면 IEC 60068-2-64의 경우 500Hz까지 설정되어 있으나 DEF STAN 00-35의 경우는 2000Hz까지 시험하도록 되어 있다. 건설용 궤도차량의 경우 고속으로 운행되는 경우는 거의 없어 고주파 성분의 영향은 고려할 필요가 없다. 따라서 주파수 범위를 500Hz까지 설정하는 것이 타당하지만, 군용 궤도차량의 경우는 고주파 성분을 반드시 고려하여야 한다. 또한, 시험레벨을 비교하면 광대역 랜덤시험만 수행하는 IEC 60068-2-64의 경우 최대값은 0.03  $g^2/Hz$  이지만 DEF STAN 00-35의 경우는 소인랜덤 성분에 의하여 10배나 큰 0.3  $g^2/Hz$ 가 된다. 그리고 시험시간을 비교하면 IEC 60068-2-64은 30분, DEF STAN 00-35은 4시간으로 설정되어 있다. 따라서, DEF STAN 00-35을 건설용 궤도차량에 적용하는 경우 IEC 60068-2-64에 의한 시험조건을 참고하여 적절히 tailoring하는 것이 바람직하다. 즉, 이 경우 시험레벨은 Fig. 4와 Table 3에 나타낸 값들을 사용하지만 광대역 랜덤시험의 주파수 범위는 500Hz까지만 설정하고 전체 시험시간도 한 축당 30분으로 설정하면 과도시험을 피함과 동시에 궤도차량의 진동특성을 반영한 시험조건을 설정할 수 있게 된다.



## 4. 결 론

본 연구에서는 기계류 부품의 진동시험에 활용할 수 있는 국제규격 및 군사규격들을 비교하고, tailoring의 필요성과 tailoring 과정에 고려해야 하는 중요한 요소들을 분석하였다. 또한 이러한 규격들을 활용하여 궤도차량에 사용되는 부품에 적용하는 방법을 사례연구를 통하여 나타내었다.

군사규격을 포함한 다양한 규격들의 차이점을 이해하고, 이를 바탕으로 시험 대상 제품의 사용환경을 가장 적절하게 표현할 수 있는 시험조건을 설정하여야 함을 보였다. 즉, 제품의 특성을 고려하고 사용자의 요구조건 또는 사용환경에 따라 같은 제품이라도 경우에 따라서는 다른 시험조건이 설정되어야 한다. 따라서, 궁극적으로는 실측 데이터를 활용하여 사용자와 공급자 모두가 만족할 수 있는 합리적인 시험조건을 선정하여야 한다. 그러나 현실적인 상황을 고려할 때, 기계류부품에 대한 진동시험은 cookbook 형태의 국제규격들을 참고하여 군사규격들을 적절하게 tailoring하여 사용할 수 있음을 보였다.

본 논문에 기술된 사례 이외에 타이어차량, 항공기, 선박 등 다른 경우에 대해서도 유사한 결과를 얻을 수 있으며, 종합적으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 군용제품에 대한 진동 시험은 DEF STAN 00-35를 적절히 tailoring하여 사용하고, 건설 및 일반 기계류 부품에 대한 진동시험은 DEF STAN 00-35와 cookbook형태의 규격인 IEC, ISO, JIS 등과 같은 규격들을 서로 비교하여 과도시험 및 부족시험의 여부를 파악한 뒤 적절하게 tailoring하여 사용하면 현실적인 대안이 될 수 있다.

## 참고문헌

- [1] International Organization for Standardization, 2005, "ISO 10055:1996, Mechanical vibration - Vibration testing requirements for shipboard equipment and machinery components".
- [2] Japanese Standards Association, 2005, "JIS D 1601 -1995, Vibration testing methods for automobile parts".
- [3] Department of Defense, 2000, "MIL-STD-810F, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests".
- [4] Ministry of Defence, 1999, "DEF STAN 00-35, Environmental Handbook for Defence Material".
- [5] Tustin, W., 2005, "Random Vibration & Shock Testing," Equipment Reliability Institute, Santa Barbara, California.

- [6] International Electrotechnical Commission, 1995, "IEC 60068-2-6, Environmental testing - Part 2: Tests - Test Fc: Vibration (sinusoidal)".
- [7] International Electrotechnical Commission, 1993, "IEC 60068-2-64, Environmental testing - Part 2: Test methods - Test Fh: Vibration, broad-band random (digital control) and guidance".
- [8] International Electrotechnical Commission, 2003, "IEC TR 60721-4-5, Classification of environmental conditions - Part 4-5: Guidance for the correlation and transformation of environmental condition classes of IEC 60721-3 to the environmental tests of IEC 60068 - Ground vehicle installations".
- [9] Harris, C. E. and Piersol, A. G., 2002, "Shock and Vibration Handbook," Fifth Edition, McGraw-Hill, pp. 19.1~20.20.