기초강좌

단축 진동시험 규격 선정을 위한 시간 영역의 가혹도 계산법

김 찬 중
(부경대학교 기계설계공학과)

1. 머리말

진동 시험을 진행하기 위해서는 신뢰성 높은 진동가진 장비가 필요하며 해당 장비에서 구현해야 하는 진동시험 규격이 반드시 필요하다. 일반적으로 시험 의뢰자가 필요한 시험 규격을 제시하는 경우에는 별다른 논의가 필요 없이 업무를 진행하면 되지만, 각 제품의 진동환경을 고려한 맞춤형 진동시험 규격을 적용해야 하는 경우나 진동 규격이 별도로 규정되어 있지 못할 경우에는 진동 시험에 책임이 있는 공학자의 판단이 필요하다. 작동 환경에 대한 데이터를 활용하여 진동 환경에 대한 가혹도를 평가할 필요가 있으며 이 강좌에서 이와 관련된 방법론을 시간영역에 대해 한정하여 소개하고자 한다. 이 강좌에서 언급하고자 하는 진동시험 규격은 2014년 전후의 내용을 기준으로 하며 만약 최신 규격으로 개정되었을 경우 해당 최신 규격을 준용하여야 한다.

2. 피로 손상도 계산

2.1 응력 데이터

진동 시험의 가혹도를 판단하기 위해 측정 응답 데이터(가속도, 응력, 변형률 등)를 이용하여 구간별로 어느 정도의 횟수가 분포하는지를 알아내어야 한다. 분류된 횟수는 해당 제품의 가장 취약한 부위의 내구 물성치와 연계를 하여 피로 손상도의 값으로 변환이 된다. 이와 같은 프로세스는 일반적인 탄성 영역의 내구 프로세스와 동일한데, 이와 같은 방법을 준용하는 가장 큰 이유는 고주파의 진동 환경에 적합한 다른 판단 기준이 없기 때문이다. 앞선 언급한 바와 같이 일반적인 내구 관점에서 측정된 데이터가 변형률(ϵ)인 경우 탄성계수(E)를 이용하여 아래와 같이 응력(σ)으로 변환이 된다.

$$\sigma = E\epsilon \tag{1}$$

응력으로 변환된 데이터는 탄성 영역에서 S-N 선도를 이용하여 아래와 같이 피로 손상도(D_σ)로 변환이 가능하다. 여기서, N_L은 해당 하중크기 조건(σ)에서 허용되는 반복 횟수이며 N_σ는 응력 σ의 횟수를 나타낸다[1].

$$D_\sigma = \frac{N_\sigma}{N_L} \tag{2}$$

식 (2)의 허용되는 반복 횟수는 S-N 선도의 기울기와 한계응력 등의 정보를 통해 얻을 수 있다.

* E-mail : cjkim@pknu.ac.kr

하지만 진동시험을 수행하는 담당자의 경우 스트레인게이지 등을 활용하여 응력 데이터를 획득하는 과정에는 다소 어려움이 따른다. 우선 진동 시험에서는 주로 가속도 데이터를 사용하기 때문에 별도의 스트레인게이지 측정 환경을 준비해야 하며 결정적으로 어떤 위치에 해당 스트레인게이지 데이터를 부착하는지를 결정해야 한다. 사실 측정되는 변형률의 경우 위치에 매우 민감도가 크기 때문에 해당 위치에 따라 진동 시험의 가혹도가 매우 민감하게 반응할 수밖에 없다.

진동 데이터만으로 가혹도를 판단할 수 있는 경우에는 진동스펙 만으로도 가혹도를 사전에 비교할 수 있으며 스트레인게이지 대비 부착 위치 등에 대한 민감도가 낮은 점 등 다양한 장점을 가지고 있다. 다만 가속도 데이터는 위에서 활용한 내구 관점의 피로손상도 결과를 직접적으로 이용할 수 없기 때문에 사전에 가속도와 변형률 사이의 정보를 미리 획득하여 2차적인 계산 과정을 통해 피로 손상도를 획득하거나 혹은 다른 우회적인 방법을 찾아야 한다.

2.2 가속도 데이터

진동시험 규격이 가속도 데이터 기반으로 구성되어 있기 때문에 가속도 데이터는 진동시험 과정에서 매우 친숙한 물리량이지만 2장에서 언급한 기존 S-N 선도를 그대로 활용할 수 없는 단점이 있다. 많이 참조되고 있는 ISO 16750-3 규격[2] 등에서는 이를 극복하기 위해 pseudo damage 개념을 도입하여 피로 손상도를 계산한다. 측정된 가속도 데이터를 응력 데이터로 가정(σ_{acc})을 한 다음 zero-crossing peak hold 방법을 활용하여 구간별 횟수를 계산한다. 응력 데이터를 활용한 구간별 횟수 계산 방법에는 일반적으로 rainflow 카운팅 방법이 많이 활용되고 있으나 평균값이 존재하지 않는 고주파의 진동시험 환경에서는 2가지 방법의 결과가 동일한 결과를 보인다. 이 결과를 바탕으로 구간별 분포되는 가상의 응력 데이터는 역시 가상의 S-N 선도를 통해 해당 응력 크기에서 허용되는 반복 횟수가 $N_{L_{acc}}$ 인 경우 아래와 같이 피로 손상도의 값으로 변환이 된다.

$$D_{\sigma_{acc}} = \frac{N_{\sigma_{acc}}}{N_{L_{acc}}} \tag{3}$$

이 과정으로부터 도출된 피로 손상도 값은 가상의 피로 손상도 값이기 때문에 물리적인 의미를 지니지 않으며 피로 손상도를 계산한 이벤트들 간의 상호 가혹도 비교에만 활용이 된다. ISO 16750-3 규격에서는 기울기 값을 3 ~ 9사이의 값을 활용하도록 권장하고 있다.

3. 가진 프로파일 결정

3.1 특수 이벤트 선정

진동 시험을 수행하기 위해 사용되는 진동 프로파일은 시험 시간을 단축시키기 위해 가혹한 데이터를 사용하는 것이 바람직하며 어떤 이벤트를 선정하는지에 따라 가진 시간의 결정이나 시험 결과의 신뢰도에 많은 영향을 주게 된다. 특수 이벤트 조건은 작동환경을 임의적으로 매우 가혹하도록 조작하는 방법과 기존 데이터의 진동 데이터 레벨을 높이는 방법 등이 있다. 전자의 경우 시험 환경을 어떻게 구성하는가에 따라 가혹도의 정도가 달라질 수 있지만 일반적으로 대상 시스템의 진동 환경을 그대로 활용하기 때문에 물리적으로 타당성이 높다. 후자에 해당하는 방법은 MIL-STD 810G[3] 등에서는 특정 계수를 활용하여 스펙트럼 값을 높이는 방법 등으로 제안되어 있는데 어느 정도의 가혹도를 임의로 높일지를 결정하는데 어려움이 있을 뿐만 아니라 실제 진동 조건과 상이한 매우 가혹한 조건이 만들어질 수

있기 때문에 많은 주의가 요구된다. 진동 시험 대상물이 보장하는 내구수명 시간을 T_0라고 가정을 하며 대상물이 일반적인 작동 환경에서 T_1시간동안 측정된 데이터를 바탕으로 D_{T_1}의 피로 손상도가 축적이 되었다면 제품의 궁극적인 목표 수명(D_{T_0})은 아래와 같이 도출된다.

$$D_{T_0} = D_{T_1} * \frac{T_0}{T_1} \tag{4}$$

이 목표 수명이 신뢰성을 가지기 위해서는 T_1 시간동안 계측된 진동 환경이 내구수명 동안의 진동 환경을 완벽하게 대표할 수 있어야 하며 그렇지 못할 경우 목표 수명의 수정이 불가피하다. 만약 측정된 구간의 진동 환경이 충분한 대표성을 가진다고 하더라도 현재 측정된 진동 데이터는 가혹도가 낮기 때문에 가진 프로파일로 사용되기에는 적당하지 않다. 따라서 궁극적인 목표 수명을 빠른 시간 안에 도달할 수 있는 특수 이벤트들이 필요하며 이 또한 담당자가 충분한 논리를 전개할 수 있어야 한다. 만약 n번째의 특수 이벤트(E_n)에 의해 축적된 피로 손상도가 D_{E_n} (시험 시간은 T_{E_n}) 이라고 하고 전체 후보들이 N개가 준비되어 있다면 아래의 식이 성립한다.

$$D_{T_0} = \sum_{i=1}^{N} T_{E_i} D_{E_i} \tag{5}$$

식 (5)를 통해 도출된 T_{E_i}는 전체 목표 수명에 대한 i번째 이벤트의 기여도인 동시에 해당 가진 조건에 대한 시험 시간에 해당한다. 따라서 해당 이벤트 조건에서의 진동 데이터를 주파수로 변환한 다음 해당 시험 시간을 부여하면 대상 시스템에 대한 시험 규격이 된다.

3.2 진동 가진 프로파일 결정

특수 이벤트들이 결정되면 진동 시험을 위해 진동 데이터들을 주파수로 변환해야 하는데 어떤 함수를 적용하는지에 대한 선택이 필요하다. 일반적으로 진동 시험은 단일 주파수 입력 기반의 조화함수 형태와 모든 주파수가 불규칙적으로 동시에 입력되는 랜덤 함수 형태로 나눌 수 있기 때문에 FFT(fast Fourier transform) 혹은 PSD(power spectral density) 함수가 사용된다. 어떤 함수를 적용하는지는 진동 환경의 패턴을 평

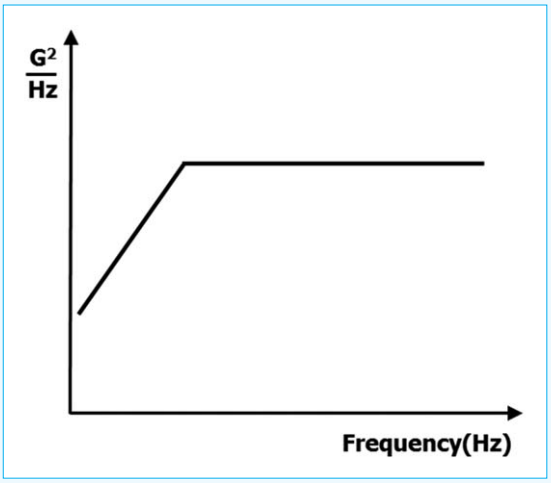

그림 1 랜덤 주파수 조건

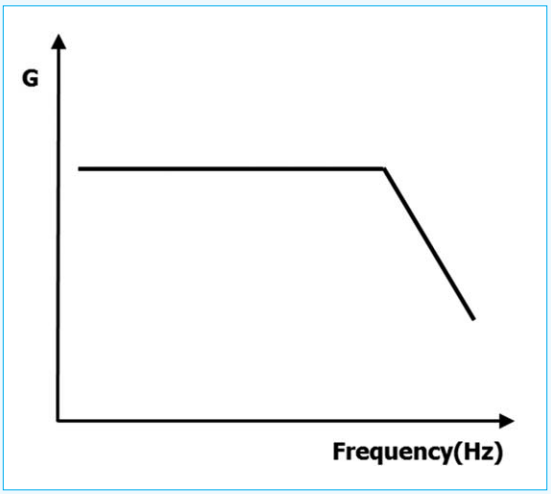

그림 2 단일 주파수 조건

가하여 선정할 필요가 있다. 진동 규격 ISO 16750-3에서는 단일 주파수 성분이 대부분인 자동차 엔진 주변 부품들에 대하여 FFT 함수를 적용하고, 랜덤 성분이 대부분인 현가장치 등의 부품들에 대해서는 PSD 함수를 적용하도록 되어 있다. 아래는 자동차 부품에 대하여 적용되는 일반적인 진동시험 프로파일의 예시이다.

최근에는 국방 쪽에서 많이 활용되고 있는 sine-on-random, random-on-random 시험 등 복합 진동 패턴을 적용하여 단축진동 시험을 보다 실제에 근접시키는 노력도 진행되고 있다. 하지만 이 시험 기법들은 응력이나 가속도 데이터를 주파수 영역에서 카운팅 하는 내용이 요구되기 때문에 이 강좌에서는 제외한다.

3. 맺음말

진동 시험의 가혹도 계산은 목표가 되는 시스템의 작동 환경을 고려하여 가혹한 특수 이벤트 조합을 얻어내는데 필수적인 프로세스이다. 이 강좌에서는 시간 영역의 데이터(가속도, 변형률)를 활용하여 내구 관점의 피로손상도 계산 방법을 소개하였으며 목표 손상도를 계산하는 과정과 특수 이벤트 조합 조건은 동일한 방법론을 따르게 된다. 이 방법론은 상당기간 검증된 내구관점의 피로수명 조건을 진동환경에 적용하였기 때문에 도출된 스펙의 신뢰도를 주장하는데 유리한 측면에 많다. 다만, 진동 스펙을 결정하기 위하여 스트레인게이지 등을 부착하여 변형률 정보를 별도로 얻어내야 하는 과정이 별도로 필요하며 어떤 위치에 해당 값을 얻어내는가에 따라 손상도 결과에 큰 영향을 주는 점을 명심하여야 한다. KSNVE

참고문헌

(1) Miner, M. A., 1945, Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics, Vol. 12, pp. 159~164.

(2) International Organization for Standardization ISO 16750-3:2007(E), Road Vehicles - Environmental Conditions and Testing for Electrical and Electronic Equipment - Part3: Mechanical Loads, 2007.

(3) Department of Defense Test Method Standard MIL-STD-810G, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, 2008.