

진동 시험 설계 방법

이 용 우 · 삼성전자 LCD총괄 광원기술그룹, 책임연구원

_e-mail : saltry.lee@samsung.com

환경시험은 전자 제품이 유통 환경 중에 노출되었을 때 충분한 내성을 가지고 있는지를 평가하는 신뢰성 시험 중에 하나다. 이 글에서는 환경시험 중에서도 포장 운송 중에 진동으로 인하여 발생할 수 있는 손상을 평가하는 진동 시험과 진동 시험 조건을 설계하는 방법에 대하여 소개하고자 한다.

유통 환경시험

신뢰성 평가를 하다보면 많이 발생하는 상황 중에 하나가 신뢰성 시험은 통과하였는데 실제 운송 중에 파손이 발생하는 경우이다. 이런 경우 제품에 문제가 있는 경우도 있지만 신뢰성 평가 조건이 실제 운송 조건을 반영하지 못하여 발생하기도 한다. 물론 반대의 상황이 나타나기도 한다. 즉, 실제 운송 중에는 전혀 문제가 발생하지 않지만 신뢰성 시험을 통과하지 못하는 경우도 발생한다. 이런 경우는 실제 운송 조건보다 신뢰성 조건이 과도하게 강화되었을 때이다. 전자의 경우는 개발된 제품에 대하여 신뢰성 평가가 완료되어 고객에게 전달되는 과정에서 파손이 발생하기

진동 시험의 설계는 유통 경로를 파악하여 유통 경로 중에 발생하는 진동 프로파일을 확보하고, 실제 운송 중에 발생하는 파손 양상이 재현될 수 있도록 진동 시험 조건을 설정하며 시료 수 및 합격 판정 기준을 결정하는 절차로 진행된다.

때문에 긴급하게 대처해야만 한다. 제품에 문제가 있을 경우에는 제품을 개선하여 대처하면 되지만, 신뢰성 평가 조건이 실제 운송 조건을 반영하지 못하는 경우에는 신뢰성 시험 조건을 개정해야만 한다. 후자의 경우는 신뢰성 조건이 실제로 요구되는 조건보다 매우 높기 때문에 제품 개발 시에 개발 비용이 지나치게 증가한다. 전자의 경우든 후자의 경우든 신뢰성 시험 조건으로서는 올바르게 설계된 것이 아니다. 그렇지만 전자의 경우에는 제품 개선

이든 신뢰성 조건 변경이든 신뢰성 평가를 통과하기까지 샘플 제작 및 평가 비용이 매우 크고, 개선 시간도 많이 소요된다. 뿐만 아니라 고객에게 제품에 대한 나쁜 인상을 주어서 제품 경쟁력을 잃게 한다. 그러므로 신뢰성 시험 조건은 실제 운송 상태를 정확히 반영해야 하지만 약간 과도하게 설정하는 것이 일반적이다.

신뢰성 시험 중에서 유통 환경 시험은 제품이 생산되어 고객에게 전달될 때까지 이동함으로써 발생하는 상황을 고려하여 가속

시험을 함으로써 제품이 유통 환경에 노출되었을 때 적절한 내성을 가지고 있는지를 평가하는 것을 목적으로 한다. 유통, 환경시험에서 주요 환경 인자는 온도, 온도 변화, 습도, 진동이고 이에 해당하는 주요 환경시험은 고온/저온 시험, 온도 사이클 시험, 열충격 시험, 고온고습 시험과 진동 시험 등이 있다. 이 글에서는 포장 운송 중에 발생하는 주요 환경 인자인 진동으로 인하여 발생하는 파손을 방지하기 위해 실시하는 진동 시험이 어떻게 설계되는지와 그에 따른 관련 시험 규격을 소개하고자 한다.

유통 환경시험의 일반적인 설계 방법은 제품의 유통 환경 프로파일을 개발하고 그에 맞는 시험 기준을 설정하면 된다. 상세하게 살펴보면 제품의 유통 환경 프로파일을 개발하기 위해서 우선 제품의 수명이 다할 때까지 예상 유통 경로를 파악하고, 예상 유통 경로 중에 제품에 영향을 미치는 주요 환경 인자를 선정한다. 그리고 선정된 환경 인자의 조건 범위를 조사하여 제품의 환경 프로파일을 확보한다. 이 후 시험 기준을 설정하기 위해서 시험 항목을 결정하고, 실제 환경 조건에서 발생하는 파손이나 결과가 재현될 수 있도록 시험 조건을 결정해야 한다. 마지막으로 시료 수 및 합격 판정 기준을 결정하면 시험 조건이 완성된다.

진동 시험 종류는 반복 충격에 대한 내성을 검토하기 위한 반복 충격 시험, 공진 주파수를 확인하고 공진 주파수 부근의 특성을 검토하기 위한 사인 시험, 일반적인 운송 조건을 재현하여 제품의 파손을 검토하는 랜덤 진동 시험 세 가지로 구분할 수 있다.

진동 시험 종류

일반적으로 진동 시험은 세 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 반복 충격 시험으로 엄밀한 의미에서는 진동시험은 아니지만 운송 중에 발생하는 반복적인 충격에 대한 내성을 파악하기 위한 시험이다. 두 번째는 특정 가속도와 주파수에서 하는 사인파 시험(sine test)이다. 사인파 시험은 스위프 시험(sine sweep test)과 드웰 시험(sine dwell test)으로 구성되어 있다. 사인 스위프 시험은 가속도를 고정시켜 놓고 주파수를 정해진 범위 내에서 천천히 변화시키는 시험이다. 한 스위프는 설정된 시험 주파수 범위의 최소 주파수부터 최대 주파수까지 증가시켰다가 다시 최소 주파수까지 감소시키는 것을 말하고, 이 때 주파수는 대수적으로 증가하고 감소한다. 전기 제품에 사용되는 부품을 평가하기 위한 시험 규격인 JEDEC No. 22-b103-B에서는 사인 스위프 시험을 필수로 요구하고 있다. 이 규격에서는 8가지 시험 조건을 설정하고 이 중에 하나를 선택하여 시험을 진행한다. 또한 스위프

율(sweep rate)은 1 decade/분, 스위프 횟수는 각 시험 방향마다 4번을 추천하고 있다. 일반적으로 사인 스위프 시험은 제품 또는 제품 포장 상태에서 제품의 공진 주파수를 찾기 위해서 사용되고 있다. 드웰 시험(dwell test)은 사인 스위프 시험으로부터 제품의 공진 주파수가 찾아지면 공진 주파수 부근에서 일정 진폭의 사인파를 가진하여 공진 주파수 부근에서 제품 특성을 파악하기 위한 진동 시험이다. 세 번째는 랜덤 진동 시험(random vibration test)이다. 랜덤 진동 시험은 실제 운송 환경을 모사하며 운송 조건, 운송 방법, 운송 거리 등에 의해 달라진다. 랜덤 진동 시험 조건은 그림 1에서처럼 일반적으로 주파수 영역에서 파워 스펙트럴 밀도(Power Spectral Density ; PSD)로 표시된다. 운송과 관련된 시험 규격은 - 예를 들면 ASTM, ISTA, EDC 등 - 운송 방법에 따라 랜덤 진동 시험의 프로파일을 제안하고 있다. ISTA에서는 랜덤 진동 시험 조건으로 Grms 값은 0.52, 주파수 범위는 1~200Hz, PSD 프로파일은 그림 1처럼 제

안하고 있다.

운송 환경 프로파일 개발

장거리 운송 방법은 기본적으로 도로, 철도, 배, 항공기의 네 가지로 구분할 수 있다. 전자 제품의 유통 환경을 파악해보면, 생산 공장에서 공항 또는 항만까지는 주로 도로를 이용하여 트럭으로 운송을 한 후에 항공기와 배를 이용하여 판매하고자 하는 지역으로 운반된다. 그리고 다시 트럭을 이용하여 그 지역의 물류 센터로 옮겨져서 고객에게 판매가 된다. 이러한 유통 경로는 기존에 비해 도로를 이용하여 운송하는 조건이 늘어난 반면에 철도를 이용하는 경우는 줄어든 것이다. 이는 도로를 이용한 운송시간이 점점 증가하고 있다는 것을 의미한다. 그러므로 이와 같이 유통 환경이 변했다면 기존에 진행해 오고 있던 신뢰성 시험 조건을 새로운 유통 환경에 맞게 갱신해 주어야 한다는 것을 의미한다.

최근 생산 공장이 도로 여건이

양호한 국내에서 도로 여건이 좋지 않은 개발도상국으로 옮겨지면서 기존의 진동 시험 프로파일이 현장의 도로 여건과 운송 환경의 변화를 제대로 반영하고 있지 못하는 경우가 많다. 제품이 중국이나 각 대륙의 생산 거점에서 생산되어 세계적으로 판매되고 있기 때문에 운송 중의 진동 프로파일이 변했을 뿐만 아니라 도로를 이용한 운송 시간도 길어져서 이를 반영하는 진동 시험 조건을 적용해야만 유통 환경을 정확히 반영한 신뢰성 시험을 할 수 있다. 특히, 중국과 같이 최근에 급격한 발전을 이루고 있는 나라는 아직까지 도로 여건이 국내에 비해 매우 열악하고 차량의 상태도 좋지 않은 경우가 많아서 기존의 진동 시험 프로파일을 적용하기가 매우 어렵다. 또한 국내에서도 운송 수단의 변화로 무진동 차량을 이용하는 경우가 늘었다. 무진동 차량의 경우 낮은 주파수의 영향은 증가하지만 높은 주파수의 영향은 감소한다. 그러므로 기존의 진동 시험 프로파일

에서 낮은 주파수 영역(1~10Hz)의 가속도 강도(acceleration intensity)는 커지고 높은 주파수 영역(200~500Hz)의 가속도 강도는 작아지는 진동 프로파일을 반영해야만 한다.

변화된 유통 환경을 반영하기 위하여 우선적으로 운송 중에 만날 수 있는 도로 조건별로 진동 프로파일을 측정하였다. 그리고 실제 운송 상태에서 무진동 트럭에 3축 진동 센서를 장착하여 유통 경로 전체에서 발생하는 진동을 측정하였다. 그림 2는 국내에서 제품이 운송될 때 측정된 진동 프로파일이고, 그림 3은 중국에서 제품이 운송될 때 측정된 진동 프로파일이다. 도로 조건 별로 측정된 자료를 검토한 결과 무진동 차량의 경우 거의 모든 도로 조건에서 낮은 주파수 영역의 PSD 값이 일반 차량의 경우보다 크다. 실제 운송 중에 얻은 진동 프로파일에서도 1~10Hz 사이의 낮은 주파수에서 상대적으로 높은 PSD가 나왔고 100Hz 이상에서는 PSD 값이 급격하게 작아진다(그림 2 참조). 중국의 경우 도로 상태가 국내보다는 좋지 않기 때문에 Grms 값이 국내보다 두 배 정도 크게 나왔을 뿐만 아니라, 그림 3에서처럼 PSD 프로파일에서도 50Hz~200Hz 사이의 주파수에서 높은 PSD 값을 가지는 것으로 확인되었다. 그러나 10Hz 이하의 낮은 주파수 영역에서 PSD 값은 상대

Frequency(Hz)	PSD Level, g ² /Hz
1.0	0.00005
4.0	0.01
16.0	0.01
40.0	0.001
80.0	0.001
200.0	0.00001

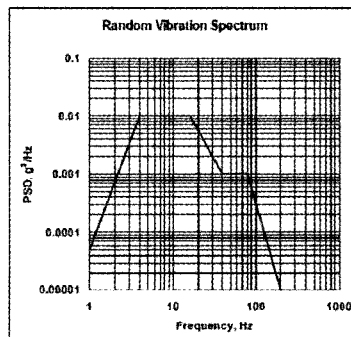


그림 1 PSD로 표시된 랜덤 진동 시험 프로파일(ISTA 3E 2001)

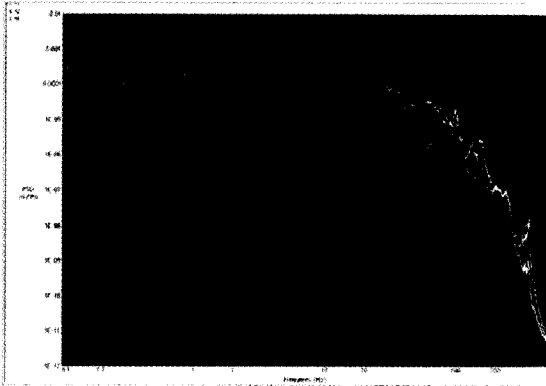


그림 2 국내 도로의 진동 프로파일

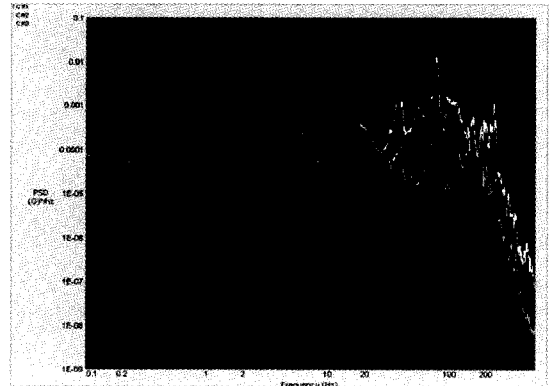


그림 3 중국 도로의 진동 프로파일

적으로 작았다. 이는 차량이 무진동 차량이고 도로 사정이 양호한 경우에는 100Hz 이상 주파수의 영향은 크게 줄어든다는 것을 의미한다. 반면에 차량이 무진동 차량이라도 도로 사정이 양호하지 않은 경우에는 30Hz~200Hz 주파수의 영향이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있으며 이로 인하여 Grms 값도 커지는 것을 확인할 수 있었다. 중국의 경우 지역마다 도로 상태가 크게 다르지만 진동 프로파일, 즉 PSD 그래프는 크게 바뀌지 않았다. 도로 상태가 나쁜 경우에는 PSD 값이 전체적으로 상승하여 Grms 값이 증가하였다.

진동 시험 기준 설정

실제 운송 중에 측정된 진동 프로파일을 바탕으로 기존의 신뢰성 시험 조건과 비교하였더니, 1~5Hz 사이의 주파수 영향이 제대로 반영되지 않은 진동 프로파일을 적용하고 있었다. 다시 말

하면 무진동 차량을 이용한 운송 조건이 고려되지 않은 진동 프로파일을 사용하고 있었던 것이다. 또한 국내에서의 운송 거리는 500km 이내이지만 중국의 경우에는 도로를 이용하여 1,500km가 넘는 거리를 운송하는 경우도 빈번하기 때문에 진동 시험 시간에도 문제가 있었다. 운송 거리가 증가하면, 운송 시간도 길어져서 진동 시험 시간도 길어진다. 시험 시간이 지나치게 늘어나면 적절한 시간 내에 신뢰성 시험을 하기가 어려워진다. 이런 경우에는 가속 시험을 적용하여 시험 시간을 줄일 필요가 있다.

시험 시간과 운송 거리와의 관계를 찾는 것은 매우 어려운 일이다. 국제 시험 규격들은 시험 시간과 운송 거리의 관계를 규정하고 있지만 시험 시간과 운송 거리와의 관계는 유통 경로 또는 운송 수단에 따라서 다르고, 도로 상태에 따라서도 다르다. Mil-Std-810E에서는 운송 거리가 1,000마일(1600km)마다 시험

시간은 60분으로 추천하고 있다. ISO 4180/2에서는 도로를 이용한 운송 거리가 1,000~1,500 km일 때 진동 시험 시간은 40분, 1,500km 이상일 경우 시험 시간은 60분, 1시간 이하의 운송 거리는 시험 시간으로 10분을 추천하고 있다. 도로 상태가 나쁜 경우와 차량이 노후화 된 경우에는 진동 시험 시간을 앞서 언급한 운송 거리의 절반만 고려하여 결정하도록 제안하고 있다. ISTA에서는 운송 거리가 500km 이하인 경우에 시험 시간은 30분, 500km씩 증가할 때마다 시험 시간도 30분씩 증가하고, 2,400 km 이상인 경우에는 시험 시간을 180분으로 제안하고 있다.

유통 경로에서 발생하는 진동 조건들을 반영하여 랜덤 진동 시험을 하게 되지만 신뢰성 시험으로써 진동 시험 조건을 결정하기 위해서는 시험 시간을 줄일 필요가 있고, 이를 위하여 가속 진동 시험 방법이 요구된다. 1993년에 Dennis Young이 시험 시간과

Grms의 강도를 이용하여 진동 시험의 가속 조건식을 다음과 같이 제안하였다.

$$I_t = I_o \sqrt{T_o/T_t}$$

여기서 I_t 는 가속 진동 조건에서 Grms 강도이고, I_o 는 원래 진동 조건에서 Grms 강도이다. T_o 는 원래 진동 조건의 시험 시간이고, T_t 는 가속 조건에서 시험 시간이다. 위의 가속 조건식은 시간 압축 비(T_o/T_t)가 5보다 작은 경우에만 적용가능하다고 언급하고 있다. 또한 가속 진동 조건의 PSD(Power Spectrum Density) 프로파일은 원래 진동 조건의 PSD 프로파일과 동일하게 하고, PSD 그래프를 상하로 움직여서 Grms 강도와 시험 시간만을 변경하여 가속시키는 방법이다. 운송 중의 진동 프로파일이 확보된 상태에서 시험 시간만을 줄이기 위하여 가속 시험을 하고자 한다면 위의 가속 조건식을 적용하여 PSD의 형태를 유지하면서 PSD 그래프를 위쪽으로 이동하여 Grms의 강도를 증가시켜 가속 진동 조건을 결정할 수 있다. 또한 실제로 발생하는 손상을 기준으로 가속 조건식을 다음과 같이 정의하기도 한다.

$$T_t = (\frac{\sigma_o}{\sigma_t})^b \times T_o$$

여기서 σ_o 는 운송 중의 진동에 의해서 받는 응력이고, σ_t 는 가속 시험에서 받는 응력이다. b 는 상수로서 금속 피로 손상에 대해서

는 4를 일반적으로 사용하고 있다. 손상을 기준으로 가속 조건을 설정하는 경우는 운송 중에 여러 개의 진동 프로파일이 순차적으로 나타날 때 적용된다. 실제 운송 조건에서 나타나는 파손 양상이 재현될 수 있도록, 제품 손상에 영향이 적은 진동 프로파일은 시험 시간을 짧게 하고 제품 손상에 영향 큰 진동 프로파일은 시험 시간을 길게 하여 순차적으로 진동 프로파일을 적용하여 가속 진동 시험 조건을 설정하는 방법이다. JEDEC에서는 시험 시간을 고정시킨 상태에서 Grms와 PSD 프로파일을 변경하여 가속 조건을 설정하는 방법을 제안하고 있다. Grms 수준에 따라서 9가지(A~I)의 진동 시험 조건(Grms와 PSD 프로파일 등)을 제시하고 있다. 진동 시험 시간은 3개의 직교 축에 각각 30분으로 고정하여 전체 시험 시간은 90분으로 한다. 그리고 실제 운송 중에 발생하는 파손 양상을 재현할 수 있도록 주어진 9개의 진동 시험 조건 중에 하나를 선정하여 가속 진동 시험을 하도록 추천하고 있다.

일반적으로 전체 유통 경로에서의 진동 프로파일은 차량, 배, 항공기, 철도의 진동 프로파일을 모두 포함하고 있고 운송 시간도 매우 길다. 게다가 각 운송 수단의 진동 프로파일은 한 개 또는 여러 개가 순차적으로 적용되기 때문에 진동 시험 조건을 결정하

기 위해서는 먼저 손상 기준으로 운송 수단에 대한 가속 조건식을 이용하여 시험 시간을 줄인다. 운송 수단에 대한 가속 조건을 적용한 후에 전체 운송 경로에 대한 PSD 프로파일을 결정한다. 이 때, 제품 손상에 미미한 영향을 주는 운송 수단의 진동 프로파일은 고려하지 않을 수도 있다. 일단 진동 시험의 PSD 프로파일이 결정된 후에는 PSD 프로파일은 고정시킨 상태에서 Grms 강도와 시험 시간 관계식을 이용하여 시험 시간을 줄인 후, 최종적으로 신뢰성 시험으로써 진동 시험 조건을 결정할 수 있다. 신뢰성 시험으로써 진동 시험이 되기 위해서는 운송 중에 발생하는 손상 또는 파손 양상을 재현할 수 있어야 한다. 그러므로 마지막으로 설계된 진동 시험을 실시하여 실제 운송 중에 발생하는 손상 양상이 재현되는 것을 확인해야 한다. 만약 진동 시험 결과와 실제 운송 중에 발생하는 손상 양상이 다를 경우 우선적으로 유통 경로 또는 그에 따른 조건이 정확히 반영되었는지 다시 확인하고, 실제 운송 상태에서 얻은 진동 프로파일과 신뢰성 조건으로 설정되어 있는 진동 시험 조건의 프로파일을 세밀하게 검토해야만 한다.

앞서 서술한 진동 시험 조건을 설정하는 방법을 주기적으로 반복하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다. 그리고 국제 시험 규격은

운송 환경의 변화 및 운송 수단의 변경을 반영하여 시험 조건을 지속적으로 개정을 하고 있기 때문에 국제 시험 규격의 시험 조건을 이용하여 진동 시험 조건을 개정하는 것도 가능하다. 그러나 시험 규격마다 진동 시험 조건이 다르기 때문에 어느 시험 규격을 따라야 할지 결정하기가 쉽지 않다. 이를 위해서는 앞서 언급한 실제 제품의 유통 경로 중에 발생하는 진동 프로파일이 필요하다. 그러므로 제품의 유통 경로가 크게 변경되는 경우에는 유통 경로 중에 발생하는 진동을 측정하여 새로운 진동 프로파일을 확보하는 것이 중요하다.

신뢰성 시험을 위한 시료 수를 결정하는 방법은 일반적으로 3가지이다. 우선 관련 시험 규격이 있을 경우 규격에서 제시하고 있

는 시료 수를 이용하는 방법이다. 다음으로는 고객이 요구하는 시료 수를 적용하는 방법이다. 마지막으로 LTPD(Lot Tolerance Percent Defective) 보증 방식에 의해 계산된 시료 수를 적용하는 방법이다. LTPD는 샘플링 검사에서 가능하면 불합격시키고 싶은 로트 불량률의 하한치를 지칭하는 것으로서 해당 시험 항목에서 최대 불량률을 $p \times 100\%$ 이하가 됨을 신뢰수준 $(1-\beta) \times 100\%$ 에서 보증하기 위해서는 n 개의 시료를 시험하여 고장 수가 c 개 이하로 발생하면 합격함으로 판정하는 방법이다. 여기서 시료 수 n 은 다음 식으로 계산된다.

$$n \geq \chi^2(3; 2c + 2) / 2p$$

예를 들어 최대 불량률을 10%

로 가정하고, 이를 95% 신뢰수준으로 보증하고자 할 경우에 고장은 발생하지 않아야 한다는 조건으로 시료 수를 계산해 보면 시료 수는 3이 된다. 일반적으로 신뢰성 시험은 비용뿐만 아니라 시간도 많이 소요되기 때문에 시료 수를 최소로 하는 것이 바람직하다. 게다가 적은 수의 시료를 가지고 합격 또는 불합격을 판정하기 때문에 고장이 발생하지 않는 조건으로 시료 수를 결정하는 것이 좋다.

마지막으로 합격 판정 기준은 일반적으로 제품의 기능적인 손상과 기계/전기적인 손상이 없는 경우에 합격으로 판정을 한다. 그러나 합격 판정 기준이 고객의 요구 조건을 판정 기준으로 한다.

기계용어해설

유효장력(effective tension)

벨트나 로프 등의 전동에서 당기는 측의 장력으로부터 느슨한 측의 장력을 뺀 힘이 원동차에서 종동차로 전해지는 것.

기전력(EMF ; electromotive force)

두 물체 사이에 전위차를 발생시키는 작용, 또는 전기회로를 연결할 때 전류를 흐르게 하는 원동력.

프레넬 렌즈(Fresnel lens)

두께를 줄이기 위하여 여러 개의 일정한 두께가 있는 폭을 갖춘 렌즈로 구성된 집광렌즈의 일종.

마찰기계(friction saw)

예리하지 않은 띠톱날이 공작물과 고속 접촉하여 생긴 마찰열로 절단하는 기계.

자유피스톤압축기(free piston compressor)

피스톤에 걸리는 힘이 내부에서 항상 평형이 되도록 2개 피스톤의 크라운을 마주보게 설치한 것.

파괴인성(fracture toughness)

부재에 균열이 있는 경우에 그것을 기점으로 하중을 증가시키지 않더라도 균열이 커져서 파괴되는 성질.