

가속화 진동내구시험 최적화

윤 성 식 | (주)팜테크, 이사 | e-mail : dyoon@famtech.co.kr

자동차 부품 등 내구재의 파손은 긴 시간 동안 누적된 비교적 크기가 작고 빈도가 많은 입력하중에 기인하거나 상대적으로 적은 수의 큰 입력하중에 의해 유발된다. 미션 프로파일화(Mission Profiling)와 미션 합성(Mission Synthesis)은 어느 시험실에서나 공동된 장비를 이용하여 실제 환경에서 제품이 받는 동일한 수준의 피로 손상도를 보장하면서 훨씬 단축된 시험을 구현할 수 있는 시험 규격을 만들어 내는 과정이다. 이 글에서는 최신의 기술을 이용하여 이와 같은 가속화 진동내구 시험의 목적을 이루는 것에 관해서 소개한다.

기존의 진동시험 규격

진동 환경하에 있는 제품의 신뢰성 및 내구 시험의 역사는 냉전시대인 1950년대까지 거슬러 올라간다. 초기의 진동시험은 내구시험보다는 초기 불량률 효과적으로 검출하기 위한 신뢰성 시험의 일환으로 기계식 진동테이블을 이용한 신뢰성 시험에서 출발했다. 내구시험은 초기불량률 검출된 정상제품의 보장 수명을 확인하기 위한 시험으로서 주로 2000CPM(33.3Hz) 속도로 작동되는 기계식 진동테이블 상에 제품을 실제 조건과 유사하게 장착하여 진동 저항시험(Vibration Resistance Test)을 정의된 시간 동안 수행하는 것이었다. 이 33.3Hz 진동저항시험은 나름대로 많은 효과가 있었기 때문에 아직도 많은 기계, 전자 심지어는 건물의 내진시험(Seismic Test)코드에서 자주 찾아 볼 수가 있다. 2~5G 수준의 2,000cpm, 즉 33.3Hz 정현파 진동은 초기의 기계식 진동시험기가 효과적으로 만들 수 있던 진동이었을 뿐만 아니라 초기 엔지니어들이 판단할 때, 충분한 동적 에너지를 제품에 가해 줄 것으로 기대 되었다. 그러나 정현파 진동이 실제 진동과 양상이 다르다는 사실은 이론적으로나 현실적

으로 문제가 있었기 때문에 진동시험 기법과 시험규격은 밀접하게 맞물려 발전하게 된다. 제품의 공진 현상이 문제가 되는 경우의 내구시험을 위해서는 공진점 검출 및 공진점 진동시험(Resonance Search, Track and Dwell)이 제시되었고, 이 즈음에 기계식 진동시험기 보다 주파수 특성이 뛰어난 전자식 진동 시험기(Electro Dynamic Shaker)가 등장하였다. 현재 대부분의 진동 내구시험은 전자식 진동시험기를 이용하여 이루어지고 있다.

정현파를 이용한 Swept Sine 시험이나 Dwell Sine 시험은 아직도 많은 내구성 제품 시험방식으로 널리 이용되고 있으나 실제 현상과는 진동의 주파수 특성과 파형의 통계적 양상이 다른 점 때문에 오늘 날의 진동시험 사양의 모태를 만든 미국방부의 1970년대 엔지니어들은 랜덤 진동시험 규격을 제안하게 된다. 정현파를 이용한 Swept

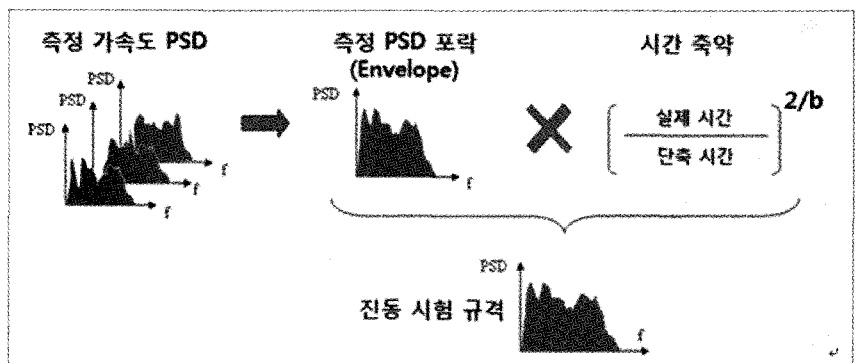


그림 1 MIL 규격에 예시된 시험 가속

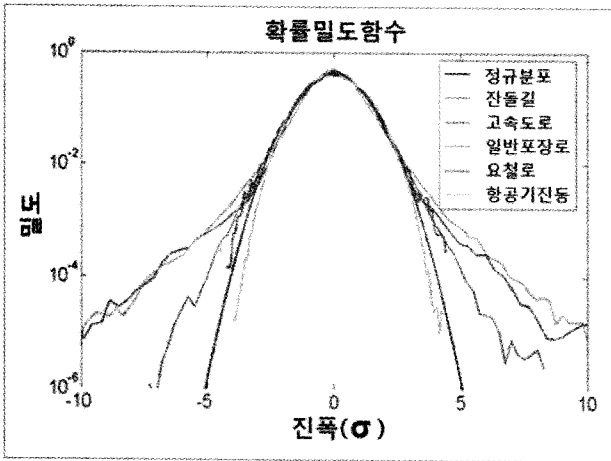


그림 2 필드데이터 분포

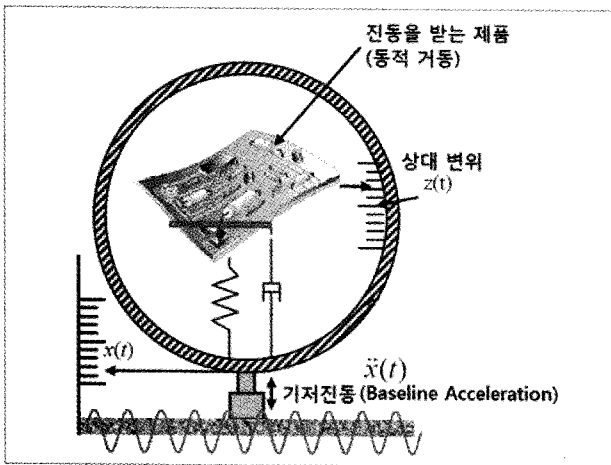


그림 3 1-자유도 구조의 응답 모델

Sine 시험에서는 피시험물의 공진 주파수를 한 시점에 하나씩밖에는 가진하지 못하지만 랜덤 진동시험에서는 동시에 주파수 범위 내의 거의 모든 공진점을 가진하는 것이 가능하고 정현파 진동보다 실제 세계의 진동에 유사한 진동을 만든다는 점에서 보다 진보되고 정확한 시험이라고 할 수 있었다.

방산품 개발에서 출발한 진동시험은 오늘날 자동차, 항공기 부품은 물론 다양한 모바일 제품의 신뢰성 및 내구성 평가에 적용되고 있다.

현재 가장 진보된 진동시험규격 개발절차로 알려진 프랑스의 GAM-EG-13 코드에 기반한 가속화 진동시험 기술을 소개하기에 앞서, MIL 규격에 제시된 이전의 가속화 진동시험 정의절차 한 가지를 간략히 살펴보고자 한다.

이 방식은 제품이 받는 환경진동을 측정하고 포락을 통해 대표 PSD를 구한 다음, 피로수명지수를 이용하여 시험 가속을 위한 부하수준조정(Load Scaling)을 하는 것으로 정리된다. 시험가속화 관점에서 볼 때, 피로수명지수를 이용하는 것은 피로이론에 기반한 근거를 갖는다고 볼 수 있지만 이 방법의 미흡한 부분은 대표 진동 스펙트럼을 구하는 부분에 있다. 랜덤 진동을 받는 제품의 실제 필드 측정 데이터를 분석해 보면 단순히 평균화 기법으로 진폭을 요약하는 것으로는 전체의 피로손상도 보존을 보장하기 어렵다. 이 문제를 보수적으로 극복하는 방법은 각 이벤트의 PSD 스펙트럼으로부터 대표 PSD를 요약할 때, 피크홀드 또는 포락(Enveloped) PSD를 구하는 것이다. 진동 과정이 정상성(Sationarity)을 갖는 경우에는 큰 문제가 되지 않지만 빈도가 적으나 강도가 큰 진동 이벤트가 존재하여 이의 영향이 전체를 덮어 써 버리는 경우, 너무 가속한 결과가 되는 문제점을 갖고 있다. 그리고 랜덤 특성을 갖는다고 알려진 대부분의 필드 측정 데이터를 관찰해 보면 그림 2와 같이 다양한 Non-Gaussian 분포가 확인되므로 선형 평균이나 포락선 PSD로 대표 스펙트럼을 요약하는 방식에 한계가 있다는 것을 알 수 있다.

진동 구조물의 1자유도 응답 모델

그림 3은 진동 입력을 받는 구조물의 이상화된 응답 모델을 나타낸 것으로 기저 입력진동에 대한 구조물의 동적 거동을 1-자유도 응답으로 가정하고 있다. 상대변위는 구조물의 변형으로 인한 응력과 비례하므로 이로부터 상대적인 피로손상도를 계산하는 것이 가능하다. 광대역 입력 진동에 대한 구조물의 실제 거동은 다분히 다자유도 응답이지만 진동으로 인한 제품의 피로손상을 주도하는 중대한 변형모드는 하나인 것으로 간주한다. 다자유도 가정의 경우보다 보수적인 결과를 얻기 때문에 SRS의 계산이나 FDS의 계산에서 1-자유도 모델을 사용한다. SRS(Shock Response Spectrum)와 FDS(Fatigue Damage Spectrum)에 대해서는 다음 절에서 소개될 것이다.

SRS와 FDS

SRS(Shock Response Spectrum)는 1930년대 미국 학계의 주요연구 대상 중 하나였던 지진에 대한 건축물의 내진설계를 연구하던 M.A Biot에 의해 1932년 확립된 개념으로 현재에도 폭약의 충격과 관련한 방산품의 시험규격이나 내지진 등급을 받아야 하는 발전소 설비 및 제어장치 등의 규격 코드에 널리 사용되고 있는 개념이다. 이는 기저 진동(Baseline Acceleration)의 영향에 놓여 있는 구조물을 1-자유도계로 가정하고 “가정된 각 주파수에서의 최대 응답”을 계산하여 각 계산된 응답의 “해당 고유주파수(X) : 최대 응답치(Y)” 형식으로 표현한 데이터를 의미한다. 설계자들은 항상 최대 응답의 크기를 필요로 했기 때문에 SRS 결과는 많은 도움이 되었다. 그림 4의 왼쪽 그림은 SRS계산과정을 도해한 것이다.

그러므로 SRS는 어떤 기저진동 입력을 받는 동적 구조물에서 예상되는 최대 응답의 크기를 계산한 값이다. SRS에서 가장 큰 값을 보이는 주파수에서 해당 크기로 큰 변형을 이룰 것이므로 이를 토대로 정적 변형을 적용한 응력해석을 한 다음 결과로부터 구조물의 구조 및 동특성을 최적화하는 것이 가능하였다.

그러나 SRS는 최대 응답의 크기만을 제공하기 때문에 구조물의 응답이 갖는 총량적인 피로손상도를 모델링하여 주지 못한다. 이를 보완하기 위해 프랑스의 공학자 Christian Lalanne은 FDS(Fati-

gue Damage Spectrum)를 제안하였다. FDS는 SRS와 유사한 방식으로 계산되지만 각 1-자유도계 응답이 갖는 최대값 대신 상대적 피로손상도를 다룬다.

미션 프로파일화와 미션 합성

제품의 일생 동안 총량적으로 제품에 가해지는 진동환경을 정의한 것을 미션 프로파일이라고 하며 다음과 같은 형식으로 예시될 수 있다.

이러한 데이터는 장기간에 걸친 사용자조건 조사를 통해서 얻을 수 있고 이에 근거하여 각각의 조건에 대해서 제품에 가해지는 기저진동의 표본 데이터를 획득할 수 있다. 다음으로 각 표본 데이터에 대한 FDS를 계산하고 반복 및 합을 구하여 총량적인 피로손상도에 해당하는 미션 FDS를 얻는 것(미션 프로파일화)이 가능하다. 이렇게 FDS를 총량적으로 구한 다음, 역변환을 통해 이에 대응되

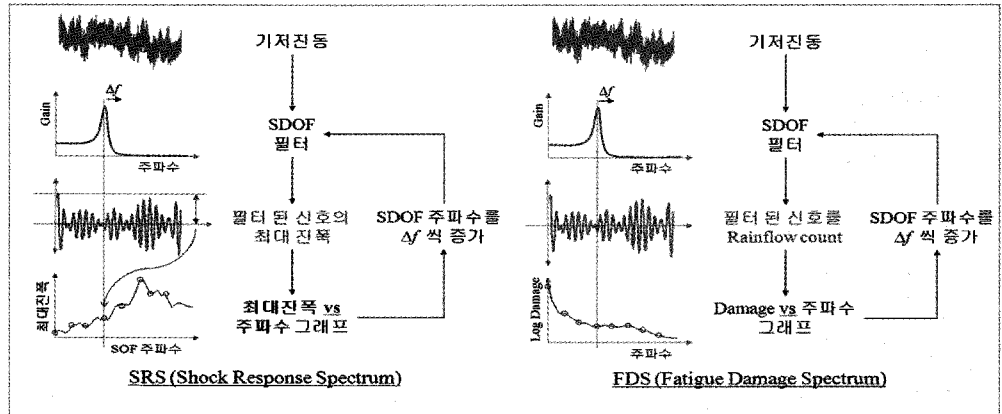


그림 4 SRS와 FDS 과정

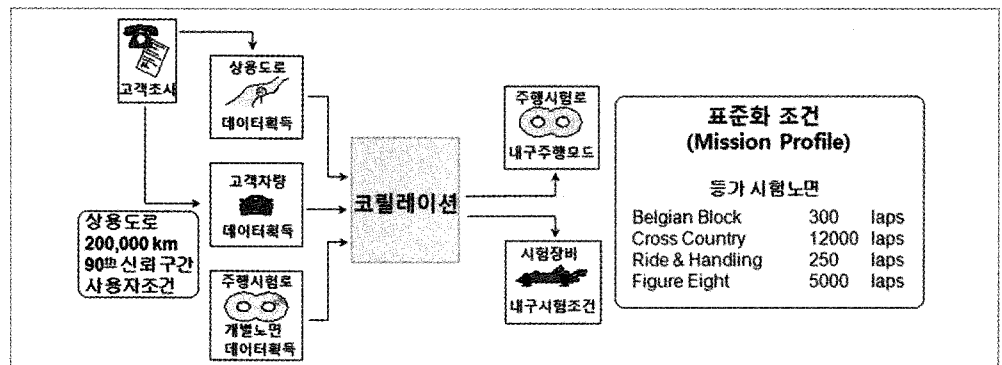


그림 5 미션 프로파일링 과정

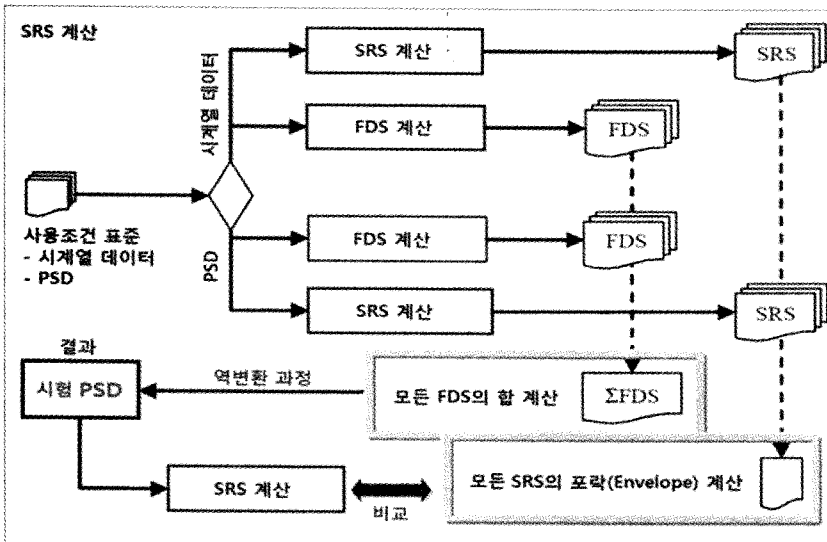


그림 6 미션 프로파일화 및 미션 합성 과정

는 앞서 소개한 MIL 규격과 마찬가지로 부하수준조정(Load Scaling)을 통한 시험 가속이 적용되어 단축된 시험시간에 대한 PSD의 에너지 수준이 계산된다. 그리고 이와 동시에 미션 프로파일의 각 표본 데이터에 대한 SRS가 계산된 다음 포락 SRS가 구해진다. 포락 SRS는 시험 PSD의 SRS와 비교되어 시험 가속화에 대한 적정성 여부를 판단하는 기준이 된다.

적용 사례

전장부품이 장착된 자동차 차체 설치용 브래킷 어셈블리가 실차 최종 시험 중 피로파손을 일으켰다. 문제 해결을 위해 구조변경을 한 다음 시제품이 만들어졌고 이를 시험검증하기 위한 가속 진동시험 조건을 생성하는 것을 목표로 한다.

진동시험기를 이용한 내구시험에 앞서, 구조해석 엔지니어들은 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 가상적인 진동시험인 진동 피로해석을 수행하도록 하였다. 실차 측정으로 확보한 기저 진동 가속도의 시계열 데이터를 주파수 변환하여 PSD를 생성한 다음, 생성된 PSD를 해석에 입력하여 가상적인 수명을 구하였다. 이 과정은 그림 8과 같이 도해할 수 있다.

위 절차는 진동피로해석으로 알려진 방법으로서 주파수 응답해석 결과를 랜덤 PSD를 이용하여 처리한 다음, 응력 PSD에 대한 주파수영역 Rainflow 카운트를 수행하여 피로수명을 구해내는 일련의 과정에 해당한다.

그림 9는 실차 측정을 통해 얻은 시계열 데이터외를 단순 주파수변환해 얻은 PSD와 사용조건 합성(Mission Profiling and Mission Synthesis)을 이용하여 구한 PSD를 비교한 것이다.

기저 진동 데이터를 선형평균을 이용하여 PSD로 변환하게 되면 평균화로 인해 피로손상도의 상당 부분을 차지하는 큰 진폭의 영향이 PSD를 통해서 재현되지 못한다. PSD가 진동시험기를 통해 재현되거나 진동피로를 통해 구현될 때

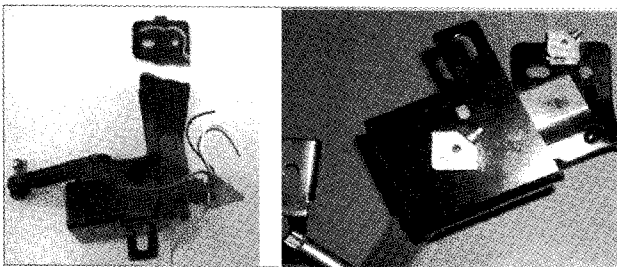


그림 7 140시간(500,000sec) 시험주행 후 파손

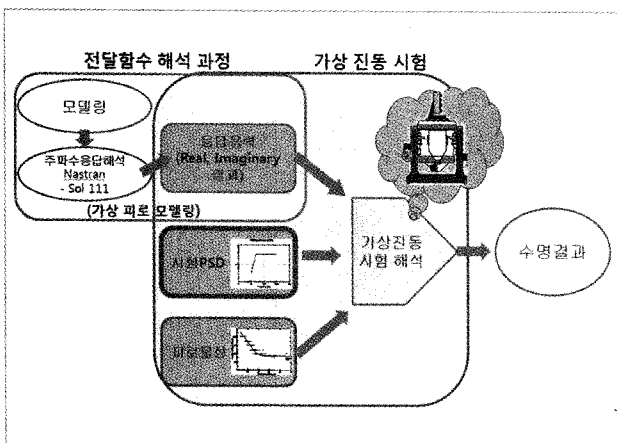


그림 8 가상 내구해석 과정 - 진동 피로해석

는 기저진동 입력 PSD를 구해 내는 과정을 미션 합성이라고 한다. (GAM-EG-13 코드에 정의)

미션 합성을 통해 최적화된 시험 PSD가 확정되는 과정에

에는 Gaussian 분포 가정에 따라 'kurtosis = 3' 의 이상적인 랜덤 진동을 만들어 내기 때문에 예의 시계열 파형과 같은 입력에 대해서는 피크의 빈도가 원본과 일치하지 않고 Crest Factor와 Kurtosis 또한 다른 값을 갖게 된다. 따라서 피로손상도 역시 증가하지 않은 결과를 갖는다. 미국의 Vibration Research에서 수행된 다양한 RLD 가속도 측정 데이터에 대한 분석 결과, 전체의 40% 정도 샘플이 Gaussian 분포보다 높은 Crest Factor와 Kurtosis를 갖는 것으로 확인이 되었다. 그림 10은 PSD가 동일(RMS가 동일)하지만 Kurtosis가 서로 다른 두 데이터의 시간영역 파형을 비교하고 있다.

RMS가 동일하지만 Crest Factor가 다른 두 데이터는 피로손상도가 현저히 다를 수 있다. 이러한 이유로 단순히 PSD를 선형평균으로 얻게 되면 피로손상도의 증가성을 확보하지 못하는 결과를 낳는다. 한편 피크홀드를 이용해 PSD를 계산할 경우, 실제보다 너무 과중한 결과를 만들게 되므로 이 경우도 올바르다고 볼 수 없다. 입력 하중의 시계열 데이터가 갖는 통계적 속성이 Gaussian 랜덤에 근사할 경우(Kurtosis = 3~4)에만 선형평균으로 구한 PSD가 유효하다고 본다. 이러한 이유로 프랑스의 국방규격인 GAM-EG-13에서는 과도성을 상당 수반한 이벤트에 대해서는 반드시 시간영역측정을 필수하고 있고 미션프로파일로 FDS를 구하는 과정에서 시계열 데이터를 기반으로 한 Rainflow 사이클 카운팅을 수행한다. 그러므로 이 과정을 통해서 결과로 얻게 되는 PSD와 단축된 시험시간은 원본 미션 프로파일과 피로손상도 관점에서 동등한 가속내구시험을 보장하게 된다.

앞서 예시한 자동차 전장부품 어셈블리 브라켓에 대한 진동피로 해석 결과는 표 1과 같다.

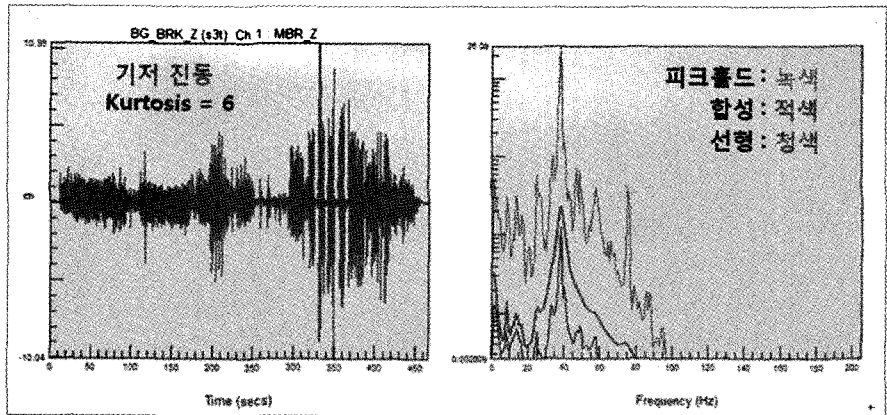


그림 9 그래프 1 - 원본 시계열 데이터 및 각 PSD 비교

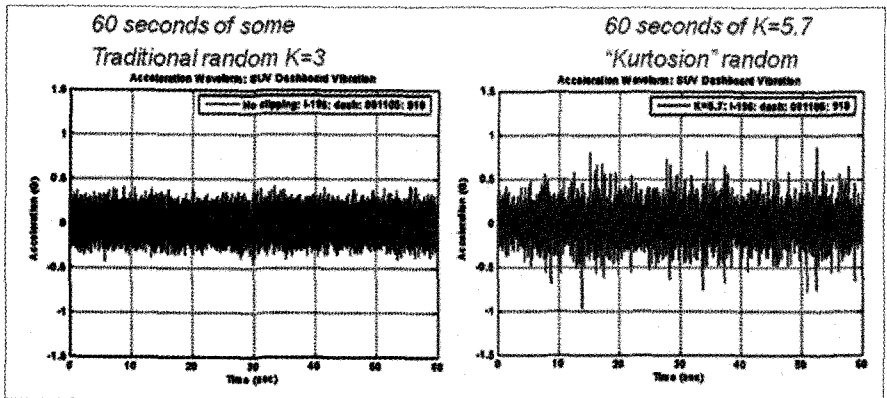


그림 10 그래프 2 - 동일한 PSD의 서로 다른 시계열 데이터

표 1 진동피로해석결과

입력 PSD	해석 수명(Seconds)
피크홀드	0.5(정적 파손)
선형 평균	6,800,000
사용조건합성 PSD	530,000
실제 시험 결과	500,000

표 2 진동시험결과

샘플 번호	시험 수명(시간)
1	3시간 30분
2	4시간 50분
평균 수명	4시간 10분

계산된 PSD가 피크홀드와 선형평균 사이에 형성된 것을 그래프-1에서와 같이 확인했고 위와 같이 수행된 해석을 통해 미션 합성 기법의 타당성을 어느 정도 검증할 수 있었다. 그러나 본 방법의 궁극적인 목적은 시험의 가속화

이므로 이를 검증하기 위해 실제 가속시험을 수행하였다. 해석입력에는 가속이 이루어지지 않은 실제 시험시간과 등가한 수준으로 정의된 PSD 를 이용하였지만 시험에서는 4시간(14,400sec) 수준으로 가속한 PSD를 이용하였다. 샘플이 충분하지 않아 2개의 샘플을 확보하여 시험을 진행한 결과 표 2와 같은 결과를 얻었다.

맺음말

가속 진동시험 규격인 프랑스의 GAM-EG-13 코드에 기반한 미션 프로파일화와 미션 합성 기법은 기존의 MIL 규격에서 다루지 않는 잠재적 피로손상도(Damage Potential)을 FDS로 다루고 있으며 이는 상대적인 양으로 표현된 피로손상도이다. 그러므로 미션을 구성하는 다양한 이벤트의 FDS는 각각의 미션 프로파일에 정의된 반복 횟수만큼 곱하고 합산하여 전체수명 미션 FDS로 만들어지고 이를 역변환하여 이에 등가한 시험시간(PSD exposure time)과 PSD 수준을 얻을 수 있다. 본 문서에서는 FDS의 계산에 관여하는 주요 파라미터 인 1-자유도 필터(전달함수)의 동특성(Q factor 또는 댐핑)과 피로손상도 잠재량 계산에 필요한 피로수명 지수에 대한 구체적인 설명을 배제하였다. 본 문서의 예에서 사용한 미션 합성 파라미터는 모두 일반적인 강구조물의 동특성 해석과 GAM-EG-13 코드에서 내정값으로 취하고 있는 것을 사용하였다.

본 문서에 제시된 바와 같이 해석과 시험을 통해 평가한 결과 미션 프로파일링과 미션 합성 기법의 유용성과 타당성을 확인할 수 있었다. 그리고 가속시험에서뿐만 아니라 CAE 상에서 진동 내구해석을 수행하는 경우에도 기존의 모드 중첩(Modal Superposition) 방법보다 진동 문제에 대한 이해와 해법을 명확하게 제공할 수 있는 방법임을 확인할 수 있었다.

PSD를 이용한 진동시험에서는 노치(Notch) 제어라는 기법으로 PSD의 특정 주파수를 제거하거나 특정 주파수의 PSD 수준을 조정하여 시험을 하는 경우가 있는데, 이는 특정 주파수가 결과(제품의 피로손상도)에 미치는 영향을 판단하기 위한 시험적 방법이다. 진동피로를 이용한 CAE 기반 피로해석에서도 동일한 PSD 노칭(Notching)이나 조정을 통

해 피로수명의 추이를 판별해 볼 수 있는데, 이 결과를 통해 입력 진동의 특정 주파수에 민감하게 영향을 받는 구조물의 동적거동 주파수를 확인할 수 있고 피로수명 개선을 위해서 이를 참고하여 구조-동특성을 변경하는 것이 가능하다.

진동시험에 있어서 시험 기술적인 면에서 최근에 시도되고 있는 것 중에서 가장 주목할 만 것은 Kurtosis 가 제어되는 변형된 랜덤 신호를 이용하는 방법이다. GM 등에서는 Kurtosis 제어를 이용한 랜덤 진동 시험을 규격화하고 있다. 이 방법은 GAM-EG-13과 달리 원본 신호의 통계적 속성을 보다 정확히 재현함으로써 피로손상도를 계산하지는 않고 피로손상도적인 면에서도 등가성에 접근하는 것을 목표로 한다. 필자의 견해로는 GAM-EG-13과 Kurtosis 제어 PSD 시험법을 통합하는 것이 가장 이상적일 것으로 기대한다. 현재 이러한 연구가 시도되고 있고 조만간 통합된 보다 진보된 시험 규격이 나타날 것으로 기대하고 있다.

참고 문헌

- (1) GAM EG-13, (1986). Essais generaux en environnement des materials. Ministere de la Defense, Delegation Generale pour l'Armement, France.
- (2) NATO AECTP 200 (2003). Validation of mechanical environmental test methods and severities. NATO AECTP 200, Ed. 3, Section 2410. Final Draft Sept 2003.
- (3) Biot M.A. (1932), Transient oscillations in elastic systems, Thesis No. 259, Aeronautics Dept., California Institute of Technology, Pasadena.
- (4) Lalanne C. (2002). Mechanical Vibration & Shock, Volume II. Hermes Penton Ltd, London.
- (5) Miles J. W. (1954), On Structural Fatigue Under Random Loading, Journal of the Aeronautical Sciences, pp.753.
- (6) Halfpenny, A. (1999) A frequency domain approach for fatigue life estimation from Finite Element Analysis, In: Proceedings of DAMAS 99 conference Dublin, (www.ncode.com).
- (7) Halfpenny A. (2001) A practical discussion on fatigue In: New Technology 2001, MIRA Warwickshire (www.ncode.com).
- (8) George Fox Lang and Philip Van Baren(2009), Random Control Square with Chi, Sound & Vibration.