

입력가진 조건에 따른 선형 시스템의 피로손상도 비교 평가

Comparison of fatigue damage of linear elastic system with respect to vibration input conditions

김찬중† · 허윤석*

Chan-Jung Kim, Yun Seok Heo

Key Words : Sine on random(조화성분이 섞인 랜덤신호), Fatigue damage(피로 손상도), 단축 가진(Uniaxial excitation), 입력 조건(Input condition), 선형 시스템(Linear elastic system)

ABSTRACT

Vibration testing is conducted for evaluate the fatigue resistance of responsible system over excitation situations and two kinds of vibration profiles, harmonic or random, are widely used in engineering fields. Harmonic excitation profile is adequate for the rotating machinery that is primarily exposed to the orderly excited force subjected for a rotating speed; Random profile is suitable for the non-stationary vibration input, that is a ground excitation for example. Recently, the sine on random (SOR) testing method was sometimes considered to represent the real excitation conditions since the measured response signals of a target system, especially for moving mobility, shows usually a mixture of them. So, it is important to understand the accumulated fatigue damage over different excitation patterns, harmonic and/or random, to determine the efficient vibration profile of a target system. A uniaxial vibration testing with a notched simple beam was introduced to evaluate the fatigue damage for different excitation profiles and the best choice of vibration profile was concluded from those comparison of calculated fatigue damages.

1. 서 론

일반적으로 수행되는 진동시험의 가진 프로파일은 주파수 영역의 정보들인 랜덤 혹은 조화가진 형태로 제공되며, 함수 형태는 PSD(Power Spectral Density)와 FFT(Fast Fourier Transform)로 표시된다[1]. 가진 프로파일을 결정하는 요소는 대상 제품이 진동 환경에 노출되어 있는 상황에 따라 결정되는데, 예를 들어 엔진 등 회전체 부품이거나 주변에

위치하는 경우에는 조화가진 형태를 따라야 하며, 진동 형태가 예측하기 매우 힘든 불규칙적인 양상을 보일 경우에는 후자의 프로파일을 따르면 된다[2]. 하지만 수송기계 등에서 보여주는 일반적인 진동 양상은 조화가진 혹은 랜덤가진의 한 가지 진동에 의해 지배적인 영향을 받는 것이 아니라 조화가진과 랜덤가진이 복합적으로 영향을 미치고 있다고 볼 수 있다[3]. 따라서 자동차 등 진동환경에 대한 높은 신뢰도를 요구하는 분야에서는 제품이 출시되기 이전에 가혹한 진동환경에서 어떠한 불량도 발생하지 않도록 가진 프로파일을 보수적으로 설계하거나 혹은 복합가진 환경을 모사하기 위해 랜덤가진 시험과 조화가진을 순차적으로 수행하여 진동내구에 대한 제품 신뢰도를 높이고 있다[4,5]. 또한 진동시험에

† 교신저자; 정회원, 교신저자 소속
E-mail : cjkim@katech.re.kr
Tel : 053-592-8971, Fax : 053-592-3169

* 계명대학교 의용공학과

대한 가진 시간을 단축하여 가속수명 시험을 진행하기 위해 국방 영역에서는 가진 형태를 복합적으로 구성하여 조화가진과 랜덤가진을 동시에 수행하는 스펙이 제공되고 있다. 본 연구에서는 조화가진과 랜덤가진을 동시에 수행하는 조건이 단순히 진동시험 시간을 줄이는 것 이외에 실제 제품의 진동내구 측면에서 어떤 영향을 주는지를 파악하기 위해 간단한 시편을 사용하여 단축진동 시험을 수행하였다. 진동시편은 간단한 형상을 지닌 선형시스템이라고 가정하여 진동시험 과정에서 비선형 요소에 의한 내구손상도의 영향은 없는 것으로 가정하였다. 또한 가진 프로파일은 단축 가진기의 사양을 고려하여 임의로 선정된 것이다. 가진 프로파일에 의해 발생된 취약 부위의 응력 정보를 분석하여 피로 손상도를 계산하였으며, 가진 프로파일의 조건에 따른 손상도 비교를 통해 제품에 대한 가진 형태의 선정 방법에 대해 고찰하였다.

2. 단순 시편에 대한 단축 가진 시험

2.1 시험 환경 구축

단순 시편은 아래 Fig. 1과 같이 보(beam)에 노치(notch)가 있는 형태로 구성하여 선형성이 보장되며 단축 가진에 의해 취약 부위가 명확하게 판단될 수 있도록 제작하였다. 시편 재료는 일반적으로 많이 사용되는 S45C를 사용 하였으며, 시편 표면에 별도의 열처리나 표면 처리를 하지 않았다. 사전에 시뮬레이션을 통해 단순 시편의 길이나 노치의 크기를 조절하였으며 가진 주파수 범위(400Hz~4,000Hz)에서 공진이 존재하도록 설계하였다. 가진 주파수 범위의 최소 주파수는 노이즈에 취약한 응력 성분이 특히 진원 노이즈로부터 분리될 수 있도록 설정된 것이며, 최대 주파수 범위는 단순 시편의 1차 공진을 충분히 포함키면서 일반적인 자동차 분야의 진동 시험 상한 값으로 결정하였다.

시편을 제작한 후 단순 시편의 동적 특성을 알아보기 위해 별도의 모달 시험을 수행하였다. 모달시험은 임팩트 해머를 사용하였으며, 응답은 서로 다른 10개 절점에 가속도를 획득하여 분석하였다. 아래 Table 1은 모달해석 결과를 보여준다.

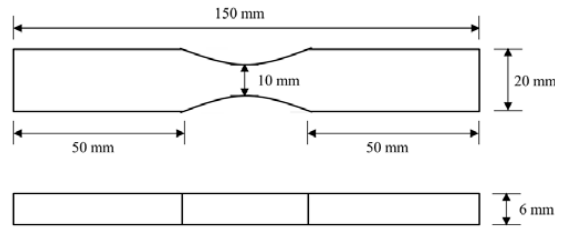


Fig. 1 Specimen: simple notched beam

Table 1 Modal parameters of simple notched beam

#	Damping(%)	Frequency(Hz)
1	0.55	1162.7

시편은 가진기에 고정하기 위해 시편의 한쪽 끝을 지그로 (Fig. 3 참고) 고정시켰으며, 진동 가진은 상하 방향(z 방향)으로만 인가하였다. 이와 같은 고정 조건에서 노치가 있는 단순 보는 한쪽은 가진기에 고정되며 다른 한쪽은 상하로 구속 없는 진동 거동을 보여주게 된다. 또한 3개의 가속도계를 활용하여 보의 위쪽 부분에 있는 서로 다른 3개 부분(#1~#3)에 대해 가속도를 측정하였으며, 보의 아래쪽 부분 중 가장 취약한 노치 중앙 부위(#4)에 스트레인게이지를 부착하여 변형을 값을 획득하였다. 특히, 측정 과정에서 시편의 아래쪽에 장착된 스트레인게이지 신호에 전원 잡음이 유입될 가능성이 크기 때문에 신호계측 장비(E-DAQ/N-CODE)의 접지 처리에 많은 노력을 하였다. 또한 가진기 아래에 큰 질량 덩어리에 단단히 고정함으로써 가진기 아래에서 발생할 수 있는 원하지 않는 반력 요소를 차단하였다. 아래 Fig. 2는 단순 보에 부착된 센서 위치를 보여주며, Fig. 3은 단축 가진 시험을 위한 시험 준비 사진이다.

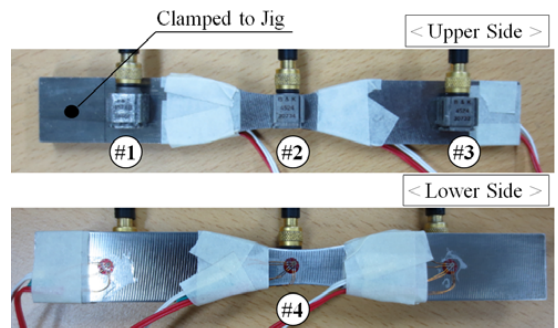


Fig. 2 Sensor location: simple notched beam

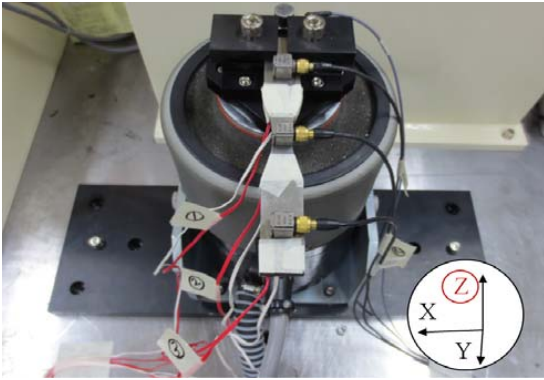


Fig. 3 Configuration of uniaxial vibration test

2.2 단축 진동시험 및 데이터 계측

단축 진동 가진을 위해 일반적으로 사용되는 조화가진 및 랜덤가진을 준비하였다. 조화가진의 경우 저주파 대역에서 고주파로 옮겨가면서 가진 크기가 줄어드는 형태로 프로파일을 결정하였으며, 랜덤가진의 경우 저주파 대비 고주파에서 낮은 진동 값을 가지도록 프로파일을 선정하였다. 이와 같은 프로파일 형태는 일반적인 진동시험 사양에서 유사하게 적용되고 있으며, 실제 가진 크기는 본 단축 가진기 및 가진기 앰프의 사양을 고려하여 임의로 결정되었다[2]. 아래 Table 2 및 Table 3은 본 시험에서 적용된 가진 프로파일 정보이며, G 값은 9.8m/sec^2 와 같은 값이다.

Table 2 Vibration profile for sinusoidal testing

No.	Frequency(Hz)	Magnitude(G^2/Hz)
1	20	0.005
2	100	0.005
3	4,000	0.001
Duration(s)		424

Table 3 Vibration profile for random testing

No.	Frequency(Hz)	Magnitude(G)
1	30	0.5
2	100	1
3	4,000	1
Duration(s)/Sweep(Oct/min)		424/1

단축 가진 시험은 위의 2가지 가진 프로파일에 대해 3가지 가진 모드로 시험을 진행하였다. 첫 번째 모드는 Table 2를 활용하여 조화가진 시험(mode I)을 진행하는 것이며, 두 번째는 Table 3 정보를

이용하여 랜덤가진 시험(mode II)을 진행하는 것이다. 또한 실제 이동수단에서 발생하기 쉬운 복합가진 모드와 유사하게 Table 2와 Table 3 조건을 모두 고려한 조건(mode III)이 마지막 3번째 가진 조건이다. 마지막 조건은 SOR(Sine on Random) 시험 조건으로 알려져 있으며 최근의 가진 제어기에서 제공되는 고급 기능 중 하나이다.

3가지 가진 모드에 대해 각각 단축가진 시험을 수행하였으며, 측정 센서를 이용하여 가속도(#1~#3)와 변형률(#4) 정보를 시간 영역으로 계측하였다. 아래 Fig. 4는 #2에서 계측된 가속도 데이터이며, Fig. 5는 #4에서 계측된 변형률 데이터이다. 조화가진 조건에서는 가진 주파수가 증가하면서 후반부에 공진점이 존재하여 응답이 크게 발생하고 있음을 확인할 수 있으며, 모드 3 조건은 나머지 2개 모드의 응답 값이 섞여져 있다.

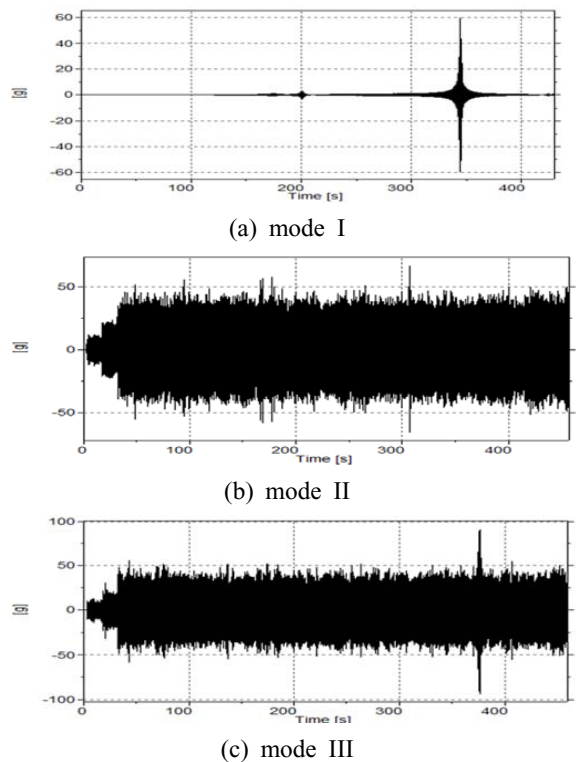


Fig. 4 Measured acceleration data for each excitation mode

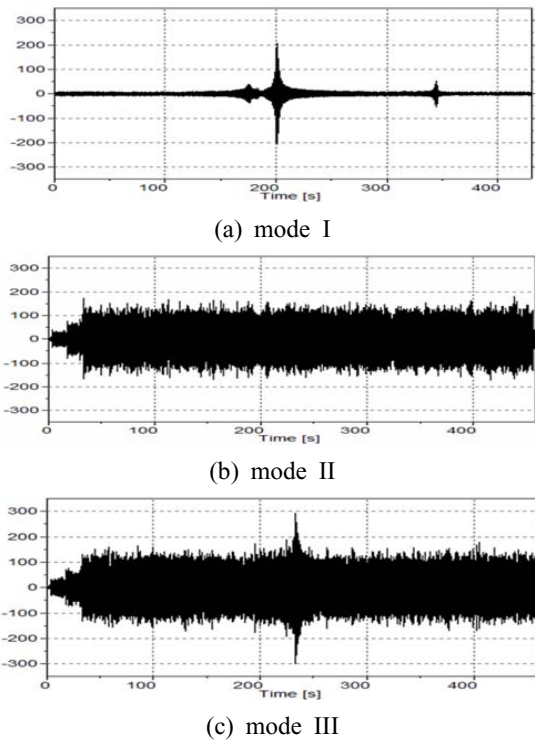


Fig. 5 Measured strain data for each excitation mode

3. 단순 시편의 피로손상도 분석

3.1 피로 손상도 분석 이론

본 연구에서 사용된 시편은 중간에 노치가 있는 보로써 실제적으로 약간의 비선형 특성을 가질 수 있으나 무시할 수 있을 정도의 선형 시스템이라고 가정하였다. 이와 같은 조건에서 피로 손상도를 일반적으로 분석하는 방법은 Minor 법칙을 활용하는 것이다. 만약 i 번째 사이클에서 s_i 크기의 변형률이 시스템에서 발생할 경우 시스템은 식 (1)의 관계식으로 피로 손상도를 가지게 된다.

$$D_i = \frac{s_i}{N_{s_i}} \quad (1)$$

여기서, N_{s_i} 는 해당 재료가 크기 s_i 변형률에 의해 국부 취약 부위에서 크랙이 발생할 때까지 견딜 수 있는 한계 가진 횟수이다. 전체 가진이 종료되는 시점에서 시편은 많은 수의 변형률 사이클을 가지게 되고, 이러한 사이클들로부터 발생하는 피로 손상도를 합산하면 식 (2)와 같이 가진 시험 중 중첩된 최

종 피로 손상도(D_T)를 얻어낼 수 있다.

$$D_T = \sum D_i \quad (2)$$

하지만 일반적으로 진동시험을 진행하는 과정에서는 가속도 데이터만을 활용하여 공진점 검출이나 시험 상태를 모니터링 하는 경우가 많기 때문에 제품의 물리적인 피로 손상도를 계산하는 것이 어렵다. ISO 16750-3 등 진동시험을 규정한 국제 규격에서는 이와 같은 문제점을 극복하기 위해 가속도 데이터만으로 피로 손상도를 나타낼 수 있는 개념을 도입하였다[2]. 진동 시험을 진행하는 것은 해당 제품에 대한 진동내구 특성을 판단하는 것이며, 일부 시험을 제외하고는 취약 부위에서의 내구성을 평가하는 것이 일반적인 진동시험의 방법이기 때문에 피로 손상도가 반드시 필요하기 때문이다. 만약 j 번째 사이클에서 a_j 크기의 변형률이 시스템에서 발생할 경우 시스템은 식 (3)의 관계식으로 피로 손상도를 가지게 된다.

$$D_{a,i} = \frac{a_j}{N_{a_j}} \quad (3)$$

여기서 피로 손상도를 계산하기 위해 변형률이 경우와 마찬가지로 N_{a_j} 라는 재료 한계 사이클 정보를 도입하게 된다. 하지만 본 한계 사이클 정보는 대상 시편과 가속도 사이의 물리적인 관계에 의해 도출된 것이 아니라 손상도 비교 평가를 위해 가속도와 반복시험 횟수 사이의 관계를 나타내는 대표 A-N 선도로부터 도출된 것이다. 이와 같은 관계에서 피로 손상도를 합산하면 식 (4)와 같이 중첩된 최종 피로 손상도($D_{a,T}$)를 도출할 수 있다.

$$D_{a,T} = \sum D_{a,i} \quad (4)$$

3.2 진동 시험에 의한 피로 손상도 분석

단축 진동시험을 통해 획득된 가속도 및 변형률 데이터를 활용하여 피로 손상도를 분석하였다. 시편에 사용된 재료(S45C)에 의거하여 아래 Table 4의 S-N 선도 데이터를 사용하였으며, 측정된 데이터들이 고주파 영역에 존재하기 때문에 zero-crossing 알고리즘에 기반을 두어 계산을 수행하였다.

Table 4 Material property of simple notched beam

Material	Fatigue strength exponent	Stress range intercept
S45C	-0.0806	664.5 MPa

특히 가속도의 경우 ISO 16750-3에서 규정한 바와 같이 대표 선도를 활용하여 피로 손상도를 도출하기를 권유하고 있으나 어떤 선도를 활용하더라도 상대적인 작대로만 활용되기 때문에 본 논문에서는 Table 4의 정보를 그대로 가속도에도 적용하였다. 아래 Table 5는 가속도 및 변형률 데이터로부터 계산된 피로 손상도를 정리한 것이다.

Table 5 Vibration profile for random testing

Data	Test mode	Damage
Acceleration	mode I	8.3e-11
	mode II	1.2e-11
	mode III	5.4e-9
	summation	9.8e-10
Strain	mode I	6.7e-13
	mode II	2.9e-14
	mode III	4.27e-10
	summation	9.0e-10

Table 5에서 ‘summation’ 이라고 명명된 부분은 조화가진(mode I)과 랜덤가진(mode II)에서 각각 측정된 응답 데이터들을 단순 합쳐서 피로 손상도를 계산한 것이다. 이와 관련한 시간 영역의 데이터는 아래 Fig. 6에 도시하였다.

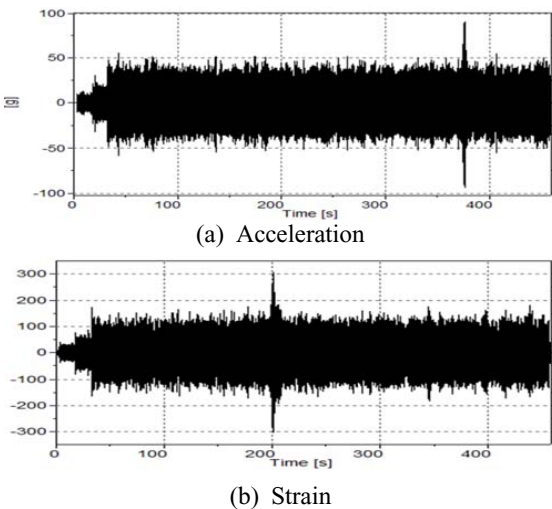


Fig. 6 Summation of response data

앞서 도시한 Fig. 4와 Fig. 5의 mode III 그래프와 비교해 보면 응답의 크기나 패턴이 매우 유사함을 알 수 있으며, 이것은 mode III의 가진 제어가 잘 되고 있다는 것을 반증하는 것이다. 따라서

Table 5의 피로 손상도 비교에서 SOR 조건과 단순 합 조건이 유사한 값을 보여주게 된다. 이와 달리 개별 가진 조건인 mode I과 mode II 조건에서는 부분 가진에 의한 응답이기 때문에 피로 손상도가 상대적으로 작게 나타났다.

4. 단축 진동가진 사양 제안

4.1 국내의 진동 시험방법 현황

국내 자동차 산업 관련 진동시험 규격은 90년도 초반 외국에서 도입한 KS R 1034에 기반하고 있으며, 외국 규격의 경우 본문에서 다수 언급한 ISO 16750-3을 준용하고 있다[2,5]. 타 산업의 경우에도 단축 가진 시험은 유사한 방법으로 진행되고 있다. ISO 16750-3의 경우 최근 2007년까지 개정되면서 대상 제품의 진동 환경을 고려하여 조화가진 혹은 랜덤가진 조건으로 나누어져 있으며, 진동 프로파일도 실제 측정 진동 데이터를 기반으로 도출된 표준화된 프로파일을 제안하고 있다. 하지만 최근에 진동내구 측면에서 보다 높은 수준의 강건성을 요구하고 있기 때문에 조화가진이나 랜덤가진을 선택적으로 사용하기보다는 2개의 진동 조건을 모두 통과해야 하는 조건으로 바뀌어가고 있다. 외국의 경우에도 국방 산업에서는 MIL-STD-810G에서 SOR 조건을 고려한 부품에 대한 규격을 명시하고 있으며, 자동차 업계에서도 실제 운행조건을 고려하고 시험 시간을 단축하기 위해 조화가진과 랜덤가진을 동시에 인가하는 진동시험 규격을 개별 시험 규격으로 사용하고 있다[4].

4.2 단축 진동가진 사양 제안

현재 국내 진동시험의 일반적인 상황인 조화가진 시험 혹은 랜덤가진 시험을 별개로 수행하는 경우와 동시에 수행하는 경우(SOR)를 진동내구 관점에서 비교하고자 할 때 앞서 진행된 단축 가진 시험 결과가 단서가 된다. 개별 시험의 경우(mode I, mode II)와 비교하여 복합진동 시험(mode III)의 경우 응답 신호들이 크기가 증가하여 피로 손상도 측면에서 매우 가혹한 조건이 된다(Table 5 참고). 문제는 실제 운송기계 등이 작동하는 상황이 회전 운동이 있는 엔진과 지면에서 올라오는 랜덤 신호들에 의해 위치별 차이는 있으나 복합적인 진동 환경에 노출되

고 있다는 것이다. 만약, 개별 진동시험을 통해 복합진동 환경을 보장하기 위해서는 진동 크기를 실제보다 크게 증가시켜야 할 것이며 이에 따라 제품은 과도한 안전 계수를 적용해야 하므로 제품 제조 단가가 증가하게 된다. 만약, 개별 시험을 순차적으로 모두 진행하는 경우에는 진동 시간이 기존 많이 증가되는 것은 물론 피로 손상도 측면에서도 실제 복합진동 환경의 가혹도를 만족시키지 못한다. 아래 Table 6은 다양한 가진 조건에 따른 장단점이다.

Table 6 Comparison of vibration test mode

Mode	Duration	Damage	Reliability
mode I	short	small	Bad
mode II	short	small	Bad
mode I → mode II mode II → mode I	long	small	Bad
mode III (SOR)	short	large	Good

실제 제품의 가진 조건이 조화가진과 랜덤가진이 혼재되어 있는 상태라고 가정하면, Table 6에 나타낸 바와 같이 가진 시간, 피로 손상도 및 신뢰성 면에서 mode III 조건이 매우 큰 장점을 가지고 있다. 특히, 피로 손상도 측면에서 실제 제품이 mode III 조건으로 이루어지기 때문에 개별 시험조건(mode I 혹은 mode II) 혹은 모드 2개를 순차적으로 수행하는 방법으로 시험 시간이 증가된다고 하더라도 피로 손상도가 실제보다 매우 작기 때문에 신뢰도가 개선되지 않는다. 따라서 향후 시험방법이 실제 진동환경과 유사하게 이루어지기 위해서는 반드시 복합진동 환경(SOR)에서 이루어져야 함을 알 수 있다.

신뢰도 높은 mode III 진동시험이 이루어지기 위해서는 2가지 기술적 한계를 극복해야 한다. 첫 번째는 실제 진동환경에서 발생하는 조화가진과 랜덤가진을 분리할 수 있는 신호기법이 필요하다. 조화가진 조건은 회전기계의 작동 범위에 따라 변화가 크기 때문에 주요 주파수 대역이 변화하기 때문에 랜덤 신호로부터 분리해 내는데 어려움이 따른다. 두 번째는 진동가진 프로파일을 추출해 내기 위한 가혹한 이벤트 시험의 개발이다. 자동차를 예를 들면, 조화가진을 위하여 다이노미 시험을 수행하였으며, 랜덤가진을 위해 주행시험장의 특수로 시험을 각각 수행하였다. 만약, SOR 시험을 위해 주행시험을 수행할 경우 조화가진이 없는 랜덤가진 조건을

별도로 만들어 내거나 혹은 가혹 이벤트 시험 후 조화가진 성분을 분리해내는 신호처리가 필요하다.

5. 결 론

진동 가진 조건에 따른 피로 손상도의 평가를 위해 노치가 있는 단순 시편을 활용하여 단축 진동시험을 수행하였다. 일반적인 진동 가진 프로파일인 조화가진 시험과 랜덤가진 시험을 대상으로 선정하였으며, 개별 가진 시험 및 복합가진 시험을 각각 수행하였다. 측정된 가속도 및 변형률을 활용하여 피로 손상도를 계산하였으며, 비교평가 한 결과 실제 진동환경이 복합적으로 구성되어 있다고 가정할 때 복합진동 시험(즉, SOR)을 수행할 경우에만 실제 진동환경에 근접하는 피로 손상도를 얻어낼 수 있었다. 따라서 국내 단축 진동시험은 시험 시간을 단축할 수 있을 뿐만 아니라 진동내구 측면에서 신뢰도가 높은 복합진동 시험을 개선되는 것이 바람직하다는 결론을 얻었다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부에서 지원하는 연구개발 과제(과제번호 : N0000005, 10043348)의 성과물로써 관계자분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Bendat J.S., Piersol A.G., 2000, Random data analysis and measurement procedures, New York, Wiley Interscience.
- (2) ISO 16750-3:2007(E), International Standard, 2007.
- (3) Kim C.J., Beak G.W., Lee B.H., 2005, Generating method of the input profile in the MAST system, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.11, No.9, pp. 904~910.
- (4) MIL-STD-810G, Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, 2008.
- (5) KS R 1034(2006v), Korean Standard, 2006.