

자동차 부품에 대한 다축 진동내구 시험용 신호처리 방법#

Signal Processing for Multiaxial Vibration Fatigue Test on Vehicle Component

배철용* · 김찬중* · 이동원* · 이봉현* · 나병철*

Chul-Yong Bae, Chan-Jung Kim, Dong-Won Lee, Bong-Hyun Lee
and Byung-Chul Na

(2008년 1월 9일 접수 ; 2008년 2월 25일 심사완료)

Key Words : Multi-axial Simulation Table(다축 가진 시뮬레이터), Optimal Algorithm(최적화 알고리즘)
Normalized Damage Isoclines(정규화된 피로도 등고선), Energy Method(에너지 방법)

ABSTRACT

Multi-axial simulation table(MAST) is widely used in motor companies as the multi-axial excitor for vibration fatigue of target component, which provides the vibrational condition as close as the vehicle test. However, the vibration fatigue performance of target component can be guaranteed with MAST system only in case the input profile covers the required severity of the target component on field test. In this paper, the signal processing for multi-axial vibration fatigue test on vehicle component is presented, from the data acquisition of the target component to the derivation of input profile. To compare the severity of vibration condition between field and proving ground, the energy principle of a equivalent damage is proposed and then, it is determined the optimal combination of special events on proving ground using a sequential searching optimal algorithm. To explain the vibration methodology clearly, seat and door component of vehicle are selected as a example.

1. 서 론

국내에서 양산되고 있는 차량들이 초기 품질이 매우 우수한 반면 진동내구 측면이 기술 선진국의 동급 차량에 미치지 못하고 있다. 또한 국내 운전자들의 진동/소음에 대한 민감도가 매우 크기 때문에 수출의 관점에서뿐만 아니라 내수 측면에서도 진동내구에 대한 신뢰성 있는 평가 방법이 요구된다.

다. 자동차 부품에 대한 진동의 내구성을 평가하기 위해서는 실제 차량의 거동 조건에서 해당 국가의 도로 성향과 운전자의 특성을 고려하여 주행 모드를 선정한 다음 보증하고자 하는 부품의 수명에 해당하는 주행시험을 수행하는 것이 가장 정확하다. 그러나 보증하고자 하는 주행거리나 시간을 만족하고, 주행 모드의 가혹도를 실차와 유사하게 설정한 경우에는 시간 및 비용에 대한 부담이 매우 크다. 특히 신차의 개발 기간이 줄어들고 있는 자동차 산업의 현실을 감안하면, 진동의 내구성만을 평가하기 위해 앞서 언급한 진동시험 조건을 선정하는 것은 현실성이 없다.

자동차 부품에 대한 진동내구 시험은 크게 단축 및 다축 시험으로 나눌 수 있으며, 좀 더 세부적인

† 교신저자: 정희원, 자동차부품연구원 에너지부품연구센터
E-mail : cybae@katech.re.kr

Tel : (041)559-3339, Fax : (041)559-3070

* 정희원, 자동차부품연구원 에너지부품연구센터

이 논문은 2007 추계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

로 각각의 시험이 일정 진폭인 가장 이상적인 경우에서부터 측정된 가속도 데이터를 이용한 시험까지 매우 다양화되어 있다^(1~4). 단축 시험의 경우 많은 표준 규격들이 정의되어 있고, 오랜 기간 동안 시험을 수행하였기 때문에 각각의 부품에 대한 고유한 시험 방법이 규정되어 있다. 그러나 단축 진동시험을 만족한 부품들이 양산화 단계에서 다른 부품들과 조립된 경우에 문제를 발생하는 경우나, 혹은 진동내구 측면에서 과도한 설계 사양을 도출할 가능성이 크기 때문에 실측 데이터를 이용하여 다축 진동시험을 수행하는 방법이 대안으로 제시되었다^(5~8). 이 경우 다축 가진 시뮬레이터(MAST) 장비와 같은 고가의 장비를 활용하여야 하는 비용적인 측면과 가속도가 높은 실측 데이터의 조합 방법론에 대한 기술적인 한계를 극복해야 한다.

이 연구에서는 다축 가진 시뮬레이터 장비를 활용하여 다축 진동내구 시험을 수행하는 과정에서 핵심이 되는 계측 데이터의 신호처리 방법에 대해 기술하고자 한다^(9~10). 대상 부품의 진동환경을 계측하기 위해 운전자의 성향이 고려된 도로조건으로 주행모드를 선정한 다음 대상 부품의 가속도를 측정하였다. 또한 실제 다축 가진 시뮬레이터 장비의 입력 신호로 사용하기 위한 가혹한 가속도를 주행시험장의 특수 노면들로부터 계측하였다. 후자의 다수 신호들은 이 논문에서 제시한 최적화 알고리즘을 통해 전자의 가속도를 만족하는 조합 신호를 얻어내었으며, 이 신호 조합은 대상 부품을 다축 가진 시뮬레이터 장비를 이용하여 진동내구 시험을 수행하기 위한 입력 프로파일이다.

2. 신호처리 과정

2.1 진동내구 시험방법

진동내구 시험방법은 대상 부품이 작은 진폭이지만 높은 주파수 대역을 가진 진동 환경에 주로 노출되는 경우에 적합한 방법으로 시스템의 동특성이 피로 손상도의 발생 과정에 영향을 주기 때문에 일반적인 내구 방법론과 차이가 있다. 일반적인 내구 관점에서는 진폭이 크고 주파수 대역이 시스템의 동특성과 연관되지 않는 낮은 대역에 국한되며, 하중이 주요한 경계 조건이 된다. 손상도를 계산하는 방법론도 시간 영역의 카운팅 방법을 활용하기 때문에,

주파수 영역에서 PSD 선도를 이용하는 진동내구의 경우와 분명히 차별화된다.

기존의 진동내구 관련 신호처리는 시간 영역의 내구 손상도 계산 방법으로 손상도를 계산하는데 어려움이 있는 진동 신호들에 적용하기 위해 개발된 방법론들로서, 주파수 영역으로 계측 신호를 변환한 다음 손상도를 예측하도록 하였다^(11,12). 하지만 이러한 방법들은 단순히 손상도를 알아내기 위한 중간 단계로 활용할 수는 있으나 다축 가진 시뮬레이터 장비와 같은 다축 진동시험 장비의 활용에 대한 단서는 제공하지 못한다. 이 논문에서 제시하고 있는 방법론은 실제 도로에서 계측한 가속도 신호들을 목적 값으로 선정된 후, 주행시험장에서 계측한 특수로의 신호들을 조합하여 등가의 가속도를 가지는 진동 프로파일을 생성하는 방법론이기 때문에 다축 가진 시뮬레이터 장비에 적용하기에 적합하다.

2.2 에너지 방법을 통한 피로 내구 계산

측정된 시간 영역의 신호를 주파수 영역에서 에너지 값으로 변환하기 위해 power spectral density (PSD) 함수를 이용하였다. 측정된 시간영역의 데이터를 $x(t)$ 라고 가정할 때, PSD 함수인 $S(f)$ 는 식 (1)의 관계식으로 표현된다^(13,14).

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(f)df = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |a_n|^2 = \frac{1}{T} \int_0^T |x^2(t)|dt \quad (1)$$

진동내구 측면에서의 입력 진동 성분은 비록 진폭이 작다고 하더라도 주파수 대역이 높기 때문에 대상 부품의 고유한 특성인 공진 현상과 연관되어 대상 부품의 피로 손상도를 가속화시킬 가능성이 크다. 시스템의 동특성은 입력 가진과 관심 부품 사이의 주파수 응답 함수를 통해 표현이 가능하다. 다양한 주파수 성분들에 대해 피로 손상도를 효율적으로 계산하기 위하여 주파수 응답 함수를 이용한 피로도 등고선(damage isoclines)을 이용하였다. 식 (2)는 정규화된 피로도 등고선(normalized damage isoclines)의 관계식이다⁽¹⁵⁾.

$$I(\omega) = \frac{\omega^{1/2-\alpha} \times \|H_m(\omega)\|^{2-\alpha}}{\left(\sum_{i=0}^{\infty} \left(\omega_i^{1/2-\alpha} \times \|H_m(\omega_i)\|^{2-\alpha} \right)^p \right)^{1/p}} \quad (2)$$

여기서, α 는 대상 재료에 대한 S-N선도의 기울기이며, p 는 정규화된 피로도 등고선의 정규화에 관련된 상수이다. H_m 은 측정된 가속도 신호와 기준 신호 사이의 주파수 응답 함수로서 실차주행시험 후 데이터 변환을 통해 얻어진다. 식 (2)는 측정된 가속도 신호를 손상도와 등가인 값으로 변환하는 과정에 활용되는데, 가진원에서의 에너지를 PSD 선도로 계측한 다음 정규화된 피로도 등고선을 이용하여 식 (3)을 도출하였다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(f)df = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{P(\omega_i)}{I(\omega_i)} \quad (3)$$

여기서, \int 는 에너지 변환, $P(f)$ 는 주파수 f 에서의 PSD 그리고 I 는 식 (2)의 정규화된 피로도 등고선이다.

3. 대상 부품에 대한 가속도 신호 계측

3.1 국내도로 주행시험

(1) 주행모드의 선정

국내도로 주행시험은 대상 부품이 실제 작동 환경에서 노출된 진동 환경을 계측하는 과정으로 대상 부품의 품질 보증 기간과 운전자의 운전 조건이 신뢰성을 가져야 한다. 국내도로 시험모드를 결정하기 위해 국내 운전자의 도로주행 특성에 관련된 보고서⁽¹⁶⁾를 참고로 도로조건을 선정하였으며, 품질 보증 기간은 시험모드의 선정 과정에서 충분한 시간을 고려하거나 혹은 일정 구간의 데이터를 이용하여 가진 프로파일을 생성한 다음 목표 기간과의 내구 손상도 관계를 규명하여 후처리로 보상한다.

Table 1은 이 연구원에서 자동차 부품의 진동내구 시험을 위해 구성한 약 800 km에 해당하는 국내도로 주행시험모드를 보여준다⁽¹⁰⁾.

사용자의 운전 습관에 근거하여 Table 1의 주행조건을 선정하였으나, 실제로 대상 부품이 노출된 진동 특성이 서로 다르기 때문에 각각의 부품에 따라 도로 구별이 달라질 수 있다. 하지만 이 논문에서는 일반적인 차량 부품에 대한 진동내구 시험 방법을 다루고 있기 때문에 부품 고유의 특성치는 반영하지 않았다.

(2) 측정 위치의 선정

기본적으로 다축 가진 시뮬레이터 장비에서 진동

내구 시험을 수행하는 과정에서 활용하는 데이터는 대상 부품에 다수의 가속도 센서를 부착하여 진동 신호를 계속하게 된다. 진동 센서의 부착 위치는 주파수 전달 함수의 측정뿐만 아니라 저주파 영역의 대 거동을 모사하기 적합한 주변 부품과 연결되는 부분으로 선정하였다. 가진 테이블의 거동을 모사하기 위해서는 최소 3곳 이상의 부분에서 신호를 계측해야 하며, 이 연구에서는 주변 부품과 연결되는 3곳을 측정 위치로 선정하였으며, R로 표시된 부분은 대상 부품의 주파수 응답 함수를 얻어내기 위한 신호 검출 부분이 된다. Fig. 1 및 Fig. 2는 중형 승용차의 도어 및 시트의 진동내구 시험을 위해 가속도 신호를 검출한 위치를 보여준다⁽¹⁰⁾.

Table 1 Field road test mode

Road	Specific information	Distance
Expressway (Kyungbu)	Chonan - Kumgang SA	104 km
	Kumgang SA - Kimchon IC	
	Kimchon IC - Kunchon SA	
National road (No. 7)	Kyungju IC - Hogeae	278 km
	Hogeae - Kyungju IC	
	Kyungju IC - Pohang city	
	Pohang city - Na. raod En.	
	Pohang - Younghae	
	Yonghae - Wonduk	
National road (No. 38)	Samchuck - Teabeak	150 km
	Teabeak - Sabuk	
Country(No.421)	Sabuk - Molwoon	21 km
Country(No.424)	Molwoon - Jungsun town	
Natioal(No.59)	Jungsun town - Jungsun dis.	
National(No.42)	Jungsun dis. - Pyeongchang	40 km
Non-pavement	Myonon - Gumdang Valley	
	Gumdang Valley - Road end	
City road (seoul)	Road end - Myonon	4.6 km
	Yangjae - Gangnam	
Non-pavement	Banpo - Hannam Bridge	4.6 km
	Gwangduk Tem. - Road end	
Total distance		739.6 km

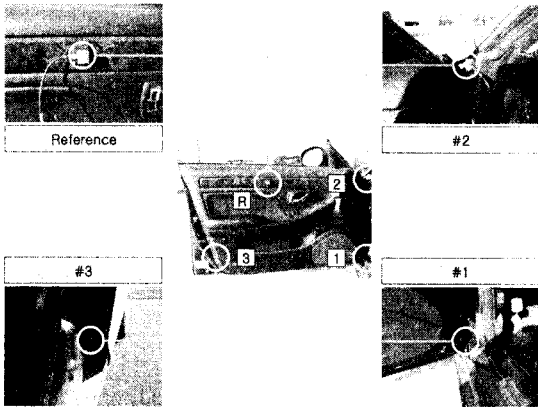


Fig. 1 Measuring point of door module

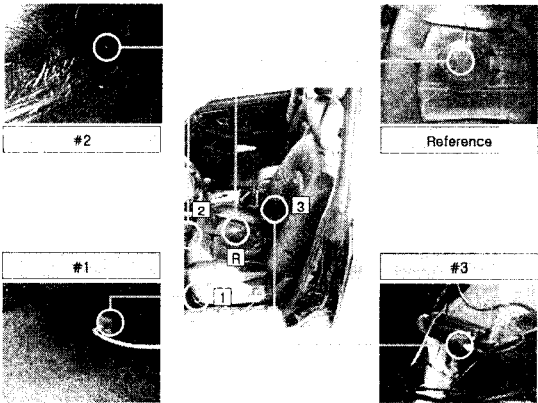


Fig. 2 Measuring point of seat module

3.2 주행시험장 주행시험

(1) 주행모드의 선정

주행시험장에서 계측된 진동 신호는 특수 노면에서 얻어진 가속도 신호로서 국내도로 주행시험의 경우와 비교하여 매우 가혹한 조건의 데이터이다. 그러므로 실차 주행시험을 통해 얻어진 방대한 가속도 데이터와 등가인 가진 조합을 선정할 때 작은 데이터 크기만으로도 등가의 손상도를 얻어내는 것이 가능하다. 등가의 손상도를 효율적으로 얻어내기 위해 주행시험장에서 제공 가능한 모든 특수로에서 가속도 데이터를 얻어내었으며, 실제 도로의 주행 조건 중 예측되는 선회주행이나 제동 신호도 포함시켜 실제의 주행 조건에 가까운 진동 조합이 이루어질 수 있도록 하였다. Table 2는 주행시험장에서 가속도 신호를 계측하기 위해 수행된 시험 모드로서 등속 주행을 기준으로 하여 동일한 특수로에 대해서도 서로

Table 2 Test mode in proving ground

#	Road	Content
1	Belgian	Constant velocity 20~60 km/h
2	Country	Constant velocity 20~60 km/h
3	Washboard	Constant velocity 20~60 km/h
4	Noise-gen.	Constant velocity 20~60 km/h
5	Cobblestone	Constant velocity 20~30 km/h
6	Chuckhole	Constant velocity 20~60 km/h
7	Impact bar	Constant velocity 20~60 km/h
8	Long-wave	Constant velocity 20~60 km/h
9	Slow brake	Constant velocity 20,40,60 km/h
10	Panic brake	Constant velocity 20,40,60 km/h
11	Circle	Constant velocity 30, 40 km/h radius : 30 m

다른 주파수를 가진 원으로 사용할 수 있다⁽¹⁰⁾.

(2) 측정 위치의 선정

도로주행시험 결과와 동일한 계측 환경에서 데이터를 얻어내어야 하기 때문에 주행시험장의 시험조건은 도로주행의 경우와 동일하다.

4. 최적화 알고리즘을 이용한 다축 가진 시뮬레이터 장비용 가진 프로파일 생성

가진 프로파일을 생성하는 전략은 국내도로를 주행하면서 획득한 가속도 데이터를 대상 값으로 두고 주행시험장에서 획득한 특수 노면들의 가속도 데이터를 조합하여 동일한 피로 손상도를 갖도록 한 후 해당 조합의 신호들을 다축 가진 시뮬레이터 장비를 위한 가진 프로파일로 제공하는 것이다. 에너지 값으로 변환된 국내도로 주행 및 주행시험장 가속도 데이터는 스칼라 값이기 때문에 선형성이 보장되며, 다수의 채널로 구성되어 행렬간의 수식으로 표현이 가능하다. 그러므로 대상 부품에 대해 실차 주행시험 결과로 만들어진 에너지 행렬을 구성한 다음, 주행시험장 시험으로부터 변환된 다수의 에너지 행렬 값들을 조합하여 전자의 행렬과의 차이가 최소화하도록 하는 최적의 조합 조건을 도출하였다. 이와 관련하여 최적화 알고리즘을 설명하기 위해 식 (4)의 에너지 행렬 A 를 도입한다.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{M1} & \cdots & A_{MN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, A 는 주행시험장 시험으로부터 획득한 가속도 데이터를 바탕으로 구성된 에너지 행렬로서, 원래의 에너지 행렬 A_p 를 계산 시간의 단축을 위해 정규화한 것이다. 각각의 ‘행’은 측정 채널이며 ‘열’은 특수도로 조건을 각각 나타낸다. 만약 주행시험장에서로부터 획득된 에너지 행렬을 B 라고 가정하고 식(5)으로 표현된다면, 정규화된 행렬 B_{norm} 는 식(6)로 나타낼 수 있다.

$$B = [B_1 \cdots B_N] \quad (5)$$

$$B_{norm} = [B_{norm,1} \cdots B_{norm,N}] \quad (6)$$

행렬 A 를 구성하는 각각의 특수노면 요소의 조합 조건을 상수비로 표현한다면, 식(7)의 행렬 T_s 로 표현이 가능하며 식(4),(5) 그리고 (6)의 식들과 연관하여 식(8)의 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$T_s = [T_{s,1} \cdots T_{s,M}] \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} T_{s,1} \\ \vdots \\ T_{s,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{M1} & \cdots & A_{MN} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} B_{norm,1} \\ \vdots \\ B_{norm,N} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, ‘+’는 Moor-Penrose 역행렬을 나타낸다. 물리적으로 T_s 는 모든 요소가 음수의 값을 가질 수 없는데, 식(8)에서는 이것을 고려할 수 없기 때문에 좌변의 T_s 값은 물리적으로 맞지 않는 결과를 도출할 수 있다. 그러므로 T_s 의 모든 요소가 양수이어야 한다는 조건을 나타내는 식(9)의 β 행렬을 도입하여 T_s 의 변수 조건을 보정한다.

$$\beta = [\beta_1 \cdots \beta_M] \quad (9)$$

$$\beta_i \geq 0, \sum_{i=1}^M \beta_i > 0 \quad (10)$$

식(8)의 행렬식으로부터 β 행렬을 추가한 새로운

형태의 행렬식을 식(11)에 나타내었으며, 관련된 변수의 조건은 식(10) 및 식(12)이다.

$$\begin{bmatrix} T'_{s,1} \\ \vdots \\ T'_{s,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & A & & \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ & & I_N & & \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} B_{norm} \\ 1 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_M \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^M T'_{s,i} = 1 \quad (12)$$

식(11)의 조건에서 도출된 T'_s 는 각각의 특수로 조합을 결정하는 인자들로서, 다축 가진 시뮬레이터 장비가 해당 특수로의 가속도 데이터를 시뮬레이션 해야 하는 시간 정보이다. 이 시간 정보는 목적 행렬인 B 와 최대한 유사한 값으로 근접해야 하며 식(13)의 목적 함수를 만족하여야 한다.

$$\operatorname{argmin}_{\beta} E \text{ for } E = \|(B_{norm})^2 - (AT'_s)^2\| \quad (13)$$

식(13)의 조건을 만족하는 최적의 시간 정보는 계산 시간의 단축을 위해 정규화된 행렬들을 이용하였기 때문에 물리적인 시간 정보로 환산하는 과정이 필요하다. 그러므로 실제 다축 가진 시뮬레이터 장비의 가진 시간으로 구성된 시간 행렬을 T 라고 가정하면, T_s 의 행렬로부터 가중치 행렬들(Φ_p, Φ_B)과의 관계를 이용하여 가진 시간을 도출한다. 만약 원래 에너지 행렬과 가중치 행렬간의 관계가 식(14)로 정의되면, 행렬 T 는 식(15)의 행렬식으로부터 얻어낼 수 있다.

$$A_p = \Phi_p A, \quad B = \Phi_B B_{norm} \quad (14)$$

$$T = \Phi_p^{-1} \Phi_B T_s \quad (15)$$

Table 3 및 Table 4는 제안된 최적화 알고리즘을 바탕으로 특수 노면 신호를 조합한 결과이다⁽¹⁰⁾. 주행시험장의 측정 정보는 20~30초 정도의 측정 데이터이며, 다축 가진 시뮬레이터 장비에서 형성한 가진 프로파일은 동일 데이터를 반복 가진하는 형태로 진동내구 시험이 수행되기 때문에 cycle의 단위로 나타내었다.

Table 3 Time information of door component

Road	Time information(S)	
Belgian	5 Cycle	5 Times
Country	1 Cycle	
Washboard	1 Cycle	
Noise-Gen.	1 Cycle	
Cobblestone	1 Cycle	
Chuckhole	1 Cycle	
Impact bar	1 Cycle	
Long-wave	1 Cycle	
Circle	3 Cycle	
Mode	40 km/h Constant velocity	

Table 4 Time information of seat component

Road	Time information(S)	
Belgian	1 Cycle	457 Times
Country	1 Cycle	
Washboard	1 Cycle	
Noise-Gen.	1 Cycle	
Cobblestone	1 Cycle	
Chuckhole	1 Cycle	
Impact bar	1 Cycle	
Long-wave	5 Cycle	
Circle	3 Cycle	
Mode	40 km/H Constant velocity	

5. 다축 가진 진동 시험

최적화 알고리즘을 바탕으로 주행시험장의 특수로에 대한 가진 정보를 획득한 다음 다축 가진 시뮬레이터 장비를 이용하여 다축 가진 진동 시험을 수행한다. 다축 가진 진동시험을 수행하기 위해서는 각 특수로에서 계측된 진동 신호들을 응답 신호로 설정한 다음 가진기와 응답 사이의 관계를 주파수 응답함수 등으로 예측한 후 가진기의 입력 가진 신호를 얻어낸다. 이 과정은 실제 대상 부품이 보여주는 비선형성과 신호들의 잡음 요소들에 의해 오차가 발생할 가능성이 크기 때문에 다수의 반복 시험이 필요

하다.

진동내구 시험을 수행하면서 사용자는 대상 부품의 실패 모드를 선정하여 시험을 수행하는 과정이나 시험 후 대상물의 진동내구 성능을 판단하게 된다. 이 논문에서 자동차 부품의 도어와 시트에 대해 다수의 예시를 들었으나, 대상 부품과 시험 목적에 따라 실패 모드가 매우 다양하다.

6. 결 론

자동차 부품에 대한 진동내구 시험을 수행하기 위해 다축 가진 시뮬레이터 장비를 활용하는 방법에 대해 기술하였다. 이 연구에서는 측정된 데이터의 신호처리 과정에 초점을 맞추어 연구내용을 진행한 바, 주행시험장의 가속한 진동 데이터로부터 대상 부품의 진동내구 시험에 적합한 다축 가진 프로파일을 생성하였다. 주행시험장 특수로의 최적 조합을 얻어내기 위해 일반 도로시험에서 얻어진 가속도 데이터를 목표로 설정한 후 최적화 알고리즘을 활용하여 특수로 데이터의 최적 조합을 통해 등가의 피로 손상도를 획득하였다. 이 논문에서 기술한 자동차 부품에 대한 진동내구 시험 방법을 순차적으로 정리하면 다음과 같다.

- (1) 대상 부품의 선정
- (2) 계측 환경 구축
- (3) 실차 도로주행시험
- (4) 주행시험장 시험
- (5) 가속도 데이터의 에너지 변환 및 에너지 행렬 구성
- (6) 최적화 알고리즘 적용
- (7) 가진 프로파일의 조합 선정
- (8) 다축 가진 시뮬레이터 장비를 활용한 다축 진동내구 시험
- (9) 대상 부품의 진동내구 성능 평가

일련의 시험 방법은 일반적인 자동차 부품에 적용이 가능하기 때문에 자동차 부품에 대한 진동내구 시험 방법의 표준화 작업에 적합하며, 개별 부품의 다축 진동내구 규격화 과정에도 기여할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 산업자원부에서 주관하는 부품소재기술개발사업의 성과 내용으로 관계자분들에게 감사드린다.

참 고 문 헌

(1) JIS D 1601:1995 Vibration Testing Methods for Automobile Parts.

(2) IEC Publication 68-2-6, 1982, "Basic Environmental Testing Procedures. Part 2: Tests".

(3) ASTM D 3580-95, 1999, "Standard Test Method for Vibration(Vehicle Linear motion) Test of Products".

(4) ISO 10326:2001(E), "Mechanical Vibration-laboratory Method for Evaluating Vehicle Seat Vibration".

(5) Morrill, J. H., Achatz, T., Khosrovaneh, A., 1998, "An Application for Fatigue Damage Analysis Using Power Spectral Density from Road Durability Events", SAE 980689.

(6) Newland, D. E., 1994, "An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis", 2nd edition, LONGMAN.

(7) Grenier, G. C., 1993, "Fatigue Damage Assessment of Vibration Test Exaggeration Methods", SAE 930402.

(8) George, T. J., Seidt, J., Shen, M. H. H., Nicholas, T. and Cross, C. J., 2004, "Development of a Novel Vibration-based Fatigue Testing Methodology", International Journal of Fatigue, Vol. 26, pp. 477~486.

(9) Kim, C.-J. and 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. 15, No. 9, pp. 1070~1076.

(10) Kim, C.-J., Bae, C.-Y., Lee, B.-H., Kwon, S.-J. and Na, B.-C., 2006, "Multi-axial Vibration Test on MAST System with Field Data", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 704~711.

(11) Bishop, N. W. M. and Sherratt, F., 1989, "Fatigue Life Prediction from Power Spectral Density DATA", Environmental Engineering, Vol. 2, Nos. 1 and 2. pp. 2~11.

(12) Wirsching, P. H. and Mohsen Shehata, A., 1977, "Fatigue Under Wide Band Random Stresses Using the Rain-Flow Method", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 99, pp. 205~211.

(13) Newland, D. E., 2006, "An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis", 2nd Edition, LONGMAN.

(14) Bendat, J. S., 2000, "Random Data Analysis and Measurement Procedures", Third Edition, JOHN WILLEY & SON, INC.

(15) Kim, C.-J., Lee, B.-H., Bae, C.-Y., Na, B.-C. and Kim, H.-C., 2006, "Verification on Damage Calculating Method of Vibration Fatigue Using Uni-axial Vibration Test", FISITA2006-Student Congress, F2006SC18.

(16) Reports (#11-1500000-001607-14, #2005-574) Published by Ministry of Construction and Transportation, Korea Government(Korean version).