

# 국내도로 주행 시험을 통한 6축 진동시험 방법에 관한 연구

## Multi-axial Vibration Test on MAST System with Field Data

김 찬 중<sup>†</sup> · 배 철 용\* · 이 봉 현\* · 권 성 진\* · 나 병 철\*\*

Chan-jung Kim, Chul-Yong Bae, Bong-hyun Lee, Seong-Jin Kwon and Byung-Chul Na

(2006년 4월 6일 접수 ; 2006년 6월 16일 심사완료)

Key Words : Energy Method(에너지 방법), Multi Axis Simulation Table(6축 가진기), Optimal Algorithm(최적화 알고리즘) Normalized Damage Isoclines(정규화된 피로도 등고선)

### ABSTRACT

Vibration test on MAST(multi axial simulation table) system has several advantage over one-axial vibration test that could simulate 6-DOF, 3-axial translation and 3-axial moment, at the same time. Since field vibration motion can be fully represented with 6-DOF, multi-axial vibration test on vehicle component is widely conducted in technical leading companies to make sure its fatigue performance in vibration environment. On the way to fulfill the process, editing technique of obtained field data is key issue to success a reliable vibration testing with MAST system. Since the original signals are not only too large to fulfill it directly, but all of the measured data is not guarantee its convergency on generating its driving files, editing technique of the original signals are highly required to make some events that should meet the equal fatigue damage on the target component In this paper, key technique on editing a field data feasible for MAST system is described based on energy method in vibration fatigue. To explain its technique explicitly, author first introduced a process on field data acquisition of two vehicle component and then, representing events are produced to keep up with the editing strategy about a energy method. In the final chapter, a time information regarding a vibration test on MAST system is derived from the energy data which is critical information to perform a vibration test.

### 1. 서 론

6축 가진기를 통한 다축 진동내구 시험은 자동차 기술 선진국에서 이미 보편적으로 사용하고 있는 진동시험 방법이다. 국내에서도 완성차 업체와 주요 자동차부품 생산업체들이 6축 가진기를 도입하여 진동 관련 시험을 시도하고 있는 단계이다. 그러나 아직은 대부분의 국내의 진동시험 규격이 단축 시험

단계에 머물러 있고 외국의 선진 업체들이 관련 규격의 공개를 꺼리고 있기 때문에 진동 시험을 수행하는 과정에서 애로사항이 많다.

6축 가진 시험을 수행하는 과정에서 가장 중요한 사항은 실제 도로 주행에서 획득한 정보를 가진 입력 프로파일로 변환시키는 방법에 있다. 6축 가진 시험을 통해 3방향의 병진 운동과 3방향의 모멘트 성분을 만들어 낼 수 있다 하더라도 어떠한 시간 영역의 데이터를 활용하느냐에 따라 기존의 단축 시험의 결과와 차별화된 시험 결과의 획득 유무가 달라지기 때문이다. 실제의 도로 주행에서 측정된 진동 데이터들은 그 양이 방대할 뿐만 아니라 모든 주행 조건을 가진 테이블을 통해 재현시키는 것이 불가능

<sup>†</sup> 책임저자; 정회원, 자동차부품연구원 에너지부품연구센터  
E-mail : cjkim@katech.re.kr

Tel : (041) 559-3124, Fax : (041) 559-3070

\* 정회원, 자동차부품연구원 에너지부품연구센터

\*\* 자동차부품연구원 에너지부품연구센터

하기 때문에 측정 데이터에 대한 신호처리 과정은 필수 사항이다. 이 논문에서는 에너지 방법에 기초한 신호처리 기법을 사용하여 실제 국내도로에서 측정된 진동 신호를 대표 PSD(power spectral density) 선도로 동일하게 재현하는 시험 방법을 제시하였다. 이를 이용하여 6축 진동시험의 대상 부품으로 선정된 중형 차량의 도어 및 시트에 대해 국내도로주행 시험에서부터 6축 진동시험을 수행하기 위한 가진 시간 정보의 획득까지의 전 과정에서 대해 연구하였다. 6축 가진기의 재현성을 고려하여 본 논문에서는 대표 PSD 선도를 구성하는 과정에서 제동모드는 제외하였다.

## 2. 진동내구 관점에서의 신호처리 과정

### 2.1 진동내구 시험 방법<sup>(1)</sup>

진동에 의해 대상 부품이 큰 영향을 받는 경우 진동내구 시험을 통해 신뢰성을 확보하게 된다. 진동에 의해 큰 영향을 받는 경우란, 힘에 의해 응력이나 모멘트가 걸리는 경우나 열에 의한 변형 보다 진동에 의한 피로 손상도가 발생하거나 작동에 이상이 생기는 확률이 현저하게 높은 경우이다. 내구의 입장에서 외력에 의해 파손 혹은 피로 손상도를 통해 대상물이 더 이상 원래의 기능을 원만하게 수행할 수 없는 경우들을 예측하거나 검증하는 작업이 주요한 내용이었다. 그러나 최근 시간 영역에서 측정된 응력을 통해 피로 손상도를 해석하는 기존의 방법에 비해 여러 가지 장점을 지닌 주파수 영역에서의 해석 접근 방법이 등장하고, 자동차 수요자들이 승차감에 대한 높은 기대수준을 요구하고 있기 때문에 진동에 의한 부품 성능 변화도 중요한 과제로 대두되는 등 내구 기술의 새로운 요구 사항들이 생겨나게 되었다.

### 2.2 에너지 방법을 통한 피로 내구 계산

측정된 신호에 대해서 주파수에 대한 power를 나타내는 함수가 PSD이다. 측정된 시간영역의 데이터를  $x(t)$ 라고 할 때, PSD,  $S(f)$ 는 식 (1)의 관계식으로 표현할 수 있다<sup>(2, 3)</sup>.

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

입력 가진 성분들이 가진 대상물에 실제로 영향을 주는 피로 손상도는 입력의 가속도 신호와 취약 부위의 응력 사이의 관계를 나타낸 주파수 응답 함수가 주요한 인자이다. 다양한 주파수 성분들에 대해 피로 손상도를 효율적으로 계산하기 위하여 주파수 응답 함수를 이용한 피로도 등고선(damage isoclines)을 이용하였다. 아래 식 (2)는 정규화된 피로도 등고선(normalized damage isoclines)의 관계식이다.

$$I(\omega_1) = \frac{\omega_1^{1/2-\alpha} \times \|H_m(\omega_1)\|^{2-\alpha}}{\left( \sum_{i=0}^{\infty} \left( \omega_i^{1/2-\alpha} \times \|H_m(\omega_i)\|^{2-\alpha} \right)^p \right)^{1/p}} \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$ 는 -S-N 선도의 기울기이다.

## 3. 국내도로 주행 시험

에너지 방법을 이용한 자동차 부품의 6축 가진 시험을 수행하기 위해 국내도로 주행 시험을 수행하였다. 6축 가진 시험기는 실제 측정 데이터를 이용하여 가진 프로파일을 생성하기 때문에 실측 데이터가 반드시 필요하다.

### 3.1 대상 부품 및 측정 위치

국내에서 생산된 2,500 cc의 중형 승용차에 장착되는 도어 및 시트에 대해 국내도로 주행시험을 수행하였다. 도어 및 시트는 진동 환경에 의해 피로 내구에 가장 영향이 큰 부품들로서 6축 가진기를 통해 진동시험을 수행하기에 적합한 자동차 부품이다. 아래 Fig. 1 및 Fig. 2는 대상부품 및 국내도로 주행 시험을 수행하면서 발생하는 가속도 신호를 계측하기 위한 측정 센서의 위치를 나타낸 그림이다.

6축 가진기는 측정 대상물을 가진 테이블에 고정된 다음 잡음 신호를 주어 시스템의 전달함수를 획득한 후 측정된 가속도 신호를 응답 신호로 두고 전달함수의 역함수를 곱하여 가진 신호를 생성해낸다<sup>(4)</sup>. 그러나 실제 측정 대상물은 선형성이 보장되지 않으며 입력/출력 신호의 잡음 요소들에 의해 불확실한 모델들이 포함되어 있기 때문에 처음의 가진 신호를 초기 값으로 두고 다수의 반복 가진 시험을

수행하여 90% 이상의 수렴성이 보장되는 가진 프로파일을 얻어내게 된다. 획득된 입력 프로파일은 측정 위치에서의 3축 가속도 신호를 10%이하의 오

차 범위에서 재현하기 때문에 6축 가진기를 통해 확보된 가진 환경은 실제의 진동 환경과 유사하여 진동내구 피로도가 실제와 비슷한 값을 가지게 된다.

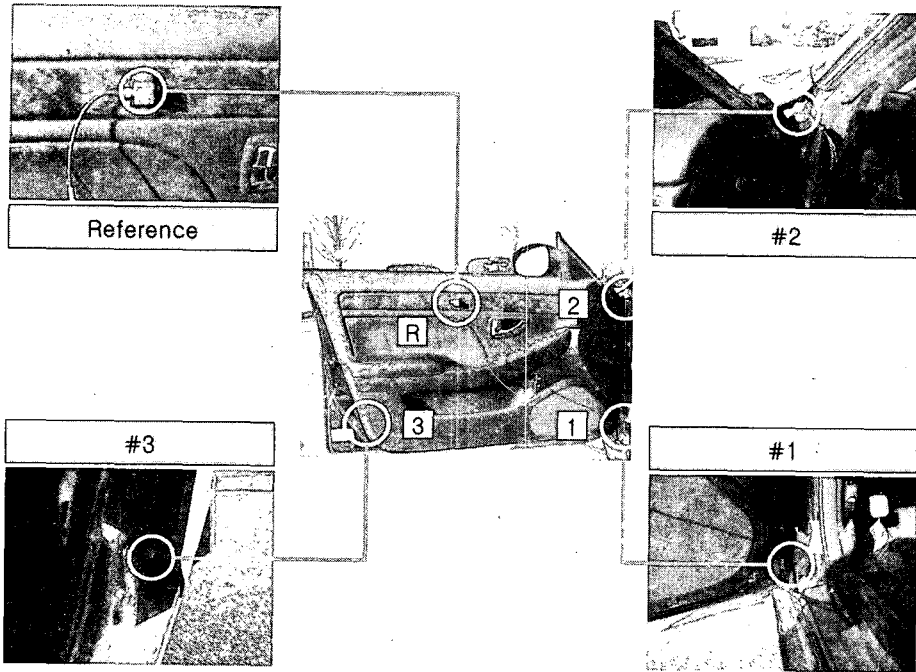


Fig. 1 Measuring point of door module

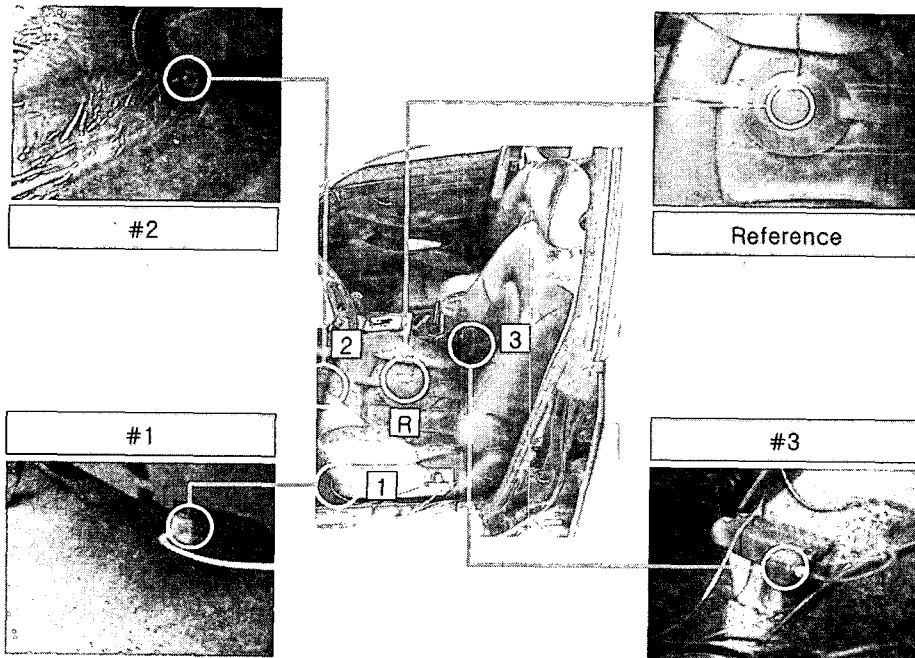


Fig. 2 Measuring point of seat module

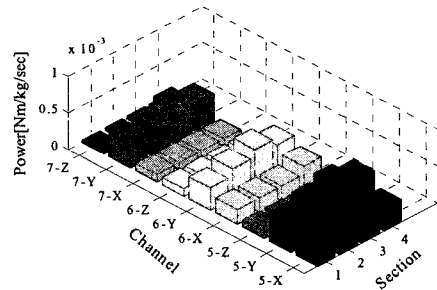
수령의 정확도를 높이기 위해서는 식별된 시스템에 대한 제어성(controllability)이 우수해야 하기 때문에 서로 다른 3곳 이상에서 측정을 수행하는 것이 바람직하다. 이 논문에서는 대상 부품에 대해 각각 3곳에서 가속도 값을 측정하고 여러번의 반복 가진 시험을 통해 가진 프로파일을 생성하였다.

### 3.2 주행시험 모드

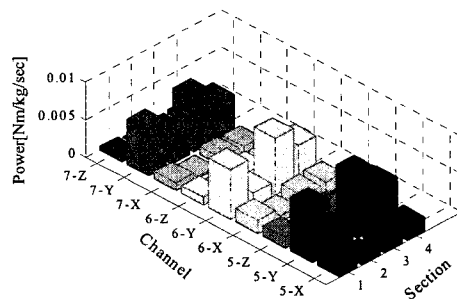
도로주행 시험모드를 선정하기 위해서는 운전자의 특성 및 국내 도로 상황 등 여러 요인들을 고려하게 된다. 이 연구에서는 국내 운전자의 도로주행 성향 등을 고려하여 Table 1의 주행 조건을 정하여 도로 주행시험을 수행하였다. 일반적인 도로주행 상황을 재현하기 위해 주행속도는 측정 당시의 교통 상황에 맞추어 변속주행을 하였다. 주행 중 주행자의 피로도를 최소화하기 위해 도로 주행 중 50분 측정, 10분 휴식하는 형태로 주행시험을 수행하였다.

Table 1 Field road test mode

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

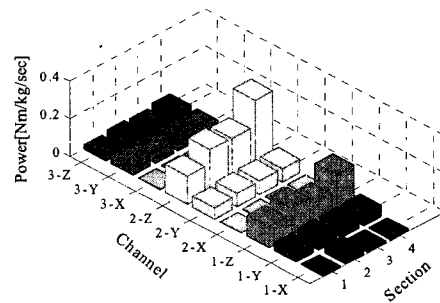


(a) Expressway

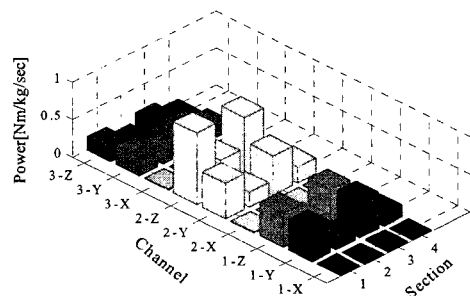


(b) Country road

Fig. 3 Compensated energy distribution in door



(a) Expressway



(b) Country road

Fig. 4 Compensated energy distribution in seat

Table 2 Energy value on each component (g<sup>2</sup>)

	Ch 1			Ch 2			Ch 3		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Door	9.9	26.3	5.4	8.6	24.0	3.9	4.4	22.8	2.1
Seat	310	1462	1672	77	1788	3308	61	1132	646

3.3 도로주행 데이터의 에너지 변환

도로주행 시험을 통해 획득된 가속도 데이터는 식 (1)의 관계식을 이용하여 각각의 방향에 대해 에너지 값으로 변환할 수 있다. 측정 대상물에 대해 3축의 입력 가진 신호와 참조 가속도 신호를 이용하여 각 방향의 전달함수를 얻어낸 다음 식 (2)의 정규화된 피로도 등고선을 이용하여 진동에 의해 발생한 실제 대상 부품의 피로도를 계산하여 보정할 수 있게 된다. Fig. 3 및 Fig. 4는 도어 및 시트에 대해 고속도로와 비포장로(면온-금당계곡)에서 측정한 가속도 데이터를 피로도가 보정된 에너지 값으로 변환한 결과를 그림으로 나타낸 것이다.

보상된 에너지 값들은 중첩이 가능하기 때문에 Table 1에서 나타난 전체의 도로 구간에 대해 전체 에너지 값으로 나타낼 수 있다. 아래 Table 2는 모든 구간에 걸쳐 측정된 응답 값의 에너지 변환 값으로 각각의 대상 부품에 가해지는 진동내구 피로도이다.

4. 주행시험장 주행 시험

4.1 주행시험장 시험의 목적

자동차부품연구원에서 보유하고 있는 주행시험장의 특수로는 벨지안로(belgian), 장파형로(long-wave), 빨래판로(washboard), 소음발생로(noise generation), 자갈길로(countryroad), 단차로 등 여러 가지 노면들로 구성되어 있다. 주행시험장 내 각 노면은 서로 다른 주파수 대역의 성분을 발생시키기 때문에 대상 부품은 동특성이 포함된 다양한 형태의 응답을 보여 준다. 주행 시험장의 특수로의 이러한 특성은 국내 도로 주행 시험을 통해 얻어진 응답을 적절한 조합을 통해 등가적으로 재구성해 낼 수 있는 적합한 조건이다. 특수로를 통해 얻어진 시간 정보는 비교적 짧은 시간 데이터를 제공하기 때문에 6축 가진기에 가진 프로파일을 생성해내는 과정에서도 유리하다. 그 밖에 선회로의 주행의 도로진동 신호(event signal)는 특수로의 정보를 통해 충분히 보상할 수

Table 3 Test mode in proving ground

#	Road	Content
1	Belgian	Const. velocity 20~60(km/h)
2	Country	Const. velocity 20~60(km/h)
3	Washboard	Const. velocity 20~60(km/h)
4	Noise-gen.	Const. velocity 20~60(km/h)
5	Cobblestone	Const. velocity 20~30(km/h)
6	Chuckhole	Const. velocity 20~60(km/h)
7	Impact bar	Const. velocity 20~60(km/h)
8	Long-wave	Const. velocity 20~60(km/h)
9	Circle	Const. velocity 30,40(km/h) ,R: 30(m)

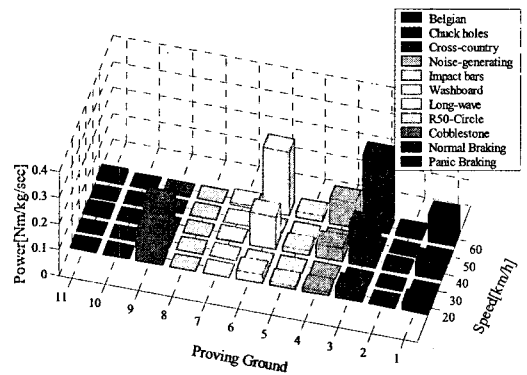


Fig. 5 Compensated energy distribution in door

없는 도로 응답 신호를 보상하는데 중요한 역할을 수행한다.

4.2 측정 위치

도로주행 시험과 동일한 위치에서 가속도 신호를 측정해야 한다. 그러므로 Fig. 1 및 Fig. 2의 측정 위치에 대해 동일한 조건으로 응답 신호를 계측하였다.

4.3 주행시험장 주행 모드

주행시험장의 주행 조건은 기본적으로 등속주행을 기본으로 하였다. 또한 직선로 및 선회로에서 가능한 주행 조건을 더하여 아래 Table 3의 주행모드에 대해 시험을 수행하였다.

4.4 주행시험장 주행 데이터의 에너지 변환

도로주행의 경우와 마찬가지로 식 (1) 및 식 (2)의 데이터를 바탕으로 측정된 가속도 신호를 이용하여 보상된 에너지 값을 얻어내었다. Fig. 5 및 Fig. 6은 대상 부품의 에너지 분포도로 각각의 주행시험장

노면에 따른 에너지 분포도의 차이를 보여주는 그림이다. 실제 도로주행에서 확보된 에너지 값과 비교하기 위한 데이터는 에너지 행렬(energy matrix)을

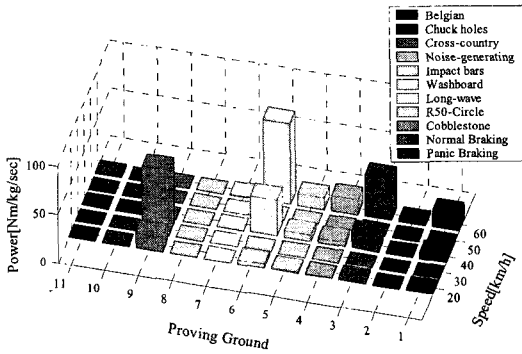


Fig. 6 Compensated energy distribution in seat

Table 4 Energy matrix in seat

	Ch 1			Ch 2			Ch 3		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Belgian	0.017	0.290	0.451	0.014	0.403	0.681	0.010	0.235	0.177
Chuck	0.013	0.327	0.443	0.010	0.387	0.700	0.008	0.194	0.139
Country	0.018	0.392	0.537	0.019	0.462	0.519	0.015	0.201	0.184
Impact	0.021	0.322	0.516	0.025	0.423	0.593	0.017	0.220	0.223
Noise	0.014	0.089	0.557	0.006	0.109	0.802	0.004	0.043	0.154
Wash	0.004	0.440	0.045	0.007	0.831	0.104	0.005	0.321	0.014
Long	0.008	0.273	0.333	0.005	0.323	0.811	0.004	0.175	0.151
Circle	0.018	0.380	0.375	0.013	0.315	0.690	0.008	0.302	0.219
Cobble	0.012	0.065	0.687	0.008	0.064	0.692	0.005	0.022	0.198

Table 5 Energy matrix in door

	Ch 1			Ch 2			Ch 3		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Belgian	0.162	0.582	0.093	0.154	0.554	0.077	0.081	0.530	0.057
Chuck	0.190	0.600	0.095	0.190	0.537	0.095	0.063	0.505	0.063
Country	0.147	0.596	0.105	0.118	0.585	0.085	0.084	0.488	0.055
Impact	0.184	0.548	0.156	0.156	0.571	0.137	0.118	0.505	0.076
Noise	0.297	0.607	0.078	0.374	0.490	0.129	0.181	0.322	0.077
Wash	0.069	0.732	0.017	0.116	0.598	0.017	0.087	0.285	0.008
Long	0.250	0.560	0.125	0.187	0.560	0.062	0.062	0.498	0.062
Circle	0.248	0.496	0.248	0.248	0.496	0.248	0.074	0.496	0.099
Cobble	0.298	0.513	0.204	0.251	0.514	0.281	0.212	0.367	0.147

이용한다. 등속주행 조건 중 모든 노면에 대해 주행이 가능한 40 km/h의 측정 조건에 대해 에너지 행렬을 구성하였다. Table 5 및 Table 6은 정규화된 에너지 행렬을 보여준다. Table 5 및 Table 6의 ‘행’은 Table 3의 주행시험장 과 동일한 순서의 주행모드이며 ‘열’은 서로 다른 3개의 측정 위치에서 측정된 9개의 측정 채널을 나타낸다.

## 5. 6축 가진 진동 시험

### 5.1 가진 시간 정보 획득<sup>(5,6)</sup>

대상 부품에 대한 도로주행 데이터를 바탕으로 Table 2의 에너지 값을 계산하였으며 도로주행 시험을 통해 Table 4와 Table 5의 에너지 행렬을 확보하였다. 도로주행 측정 데이터는 방대한 데이터 양뿐만 아니라 6축 가진 시험기에서 드라이브 파일을 생성할 수 있는 데이터의 형태가 한정되어 있기 때문에 도로주행 시험을 그대로 수행할 수 없다. 그러므로 최적화 알고리즘을 통해 주행시험장에서 확보한 노면 에너지 값들의 적절한 조합으로 도로주행 에너지 값을 나타내어야 한다.

아래 수식은 6축 가진기의 드라이브 파일을 생성하기 위해 개발된 최적화 알고리즘으로써, 대표 PSD의 데이터를 이용하여 도로주행 중 발생한 것과 동일한 내구손상도를 유발하는 가진 시간 정보( $T$ )의 조합을 얻어내는데 활용하였다<sup>(1)</sup>.

$$T = B^*C \quad (3)$$

여기서  $B$ 는 모든 시간 정보가 음수가 될 수 없다는 경계조건이 포함된 에너지 행렬,  $C$ 는 도로주행 시험을 통해 얻어진 대상 부품의 에너지 값을 나타낸 행렬이다.

기 개발된 최적화 알고리즘을 적용한 후, 대표 PSD 선도의 가진 프로파일과 실제 도로주행을 통해

Table 6 Mean energy error for given event PSD

Component	PSD event	Error
Seat	8th special event	4.31(%)
	8th special event+circle	4.26(%)
Door	8th special event	3.42(%)
	8th special event+circle	3.37(%)

얻어진 에너지 값과의 차이를 정량적으로 나타내기 위해 에너지 값의 차이를 Table 6에 나타내었다.

Table 6의 결과를 통해 대표 PSD 선도를 선정할 때 8개의 특수로 이외에 선회로를 추가하는 것이 실제의 도로 조건을 보다 근사적으로 재현할 수 있는 것을 알 수 있다. 또한 오차 값을 바탕으로 최적화 알고리즘을 통해 얻어진 가진 조건은 실제의 에너지 값이 5% 이하의 오차범위를 가지는 가진 조건임을 확인하였다. 아래 Table 7 및 Table 8은 최적화 알고리즘을 통해 확보된 가진 시간 정보이다. Cycle로 표시된 시간 정보는 각각의 특수로를 한번 주행한 시간 데이터로부터 획득된 가진 프로파일을 의미한다.

5.2 가진 프로파일 생성 및 6축 가진 시험  
일반적으로 6축 가진 프로파일을 생성하는 방법은

Table 7 Time information of door

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 8 Time information of seat

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	

잡음 신호(white noise)를 통해 시스템의 전달함수를 계산한 다음 전달함수의 역행렬을 통해 가진 신호를 확보하게 된다. 처음 얻어진 가진 프로파일 정보는 전달함수가 이상적인 경우에만 실제와 동일한 응답 신호를 생성해내기 때문에 여러 번의 반복 시험을 통해 신뢰성 있는 가진 프로파일을 확보해야 한다. 생성된 가진 프로파일은 각각의 대상 부품에 대해 Table 6과 Table 7에서 제시하는 가진 시간 정보에 준하여 6축 가진 시험을 수행하게 된다.

6. 결 론

6축 가진을 수행하기 위해 차량의 도어 및 시트를 시험 대상으로 선정한 다음 도로주행 시험을 통해 주행 중 각각의 부품에 나타나는 진동 신호를 계측하여 에너지 값을 확보하였다. 또한 주행시험장의 주행 시험을 통해 서로 다른 특수로의 노면에 따른 응답 신호를 측정하여 에너지 행렬을 계산하였다. 에너지 변환을 수행하는 과정에서 기 개발된 에너지 방법을 사용하였으며, 최적화 알고리즘을 통해 6축 가진을 수행하는 과정에서 필요한 가진 시간 정보를 도출해내었다. 대상 부품의 신호계측에서부터 가진 시간의 정보를 도출하는 일련의 과정은 6축 가진 시험을 수행하기 위한 준비 단계로써 시험의 신뢰성을 확보하는 핵심 내용이다. 자동차 부품의 단축 가진 규격만이 존재하는 국내의 기술 환경을 고려할 때, 이 논문에서 제시하고 있는 6축 시험 관련 데이터 편집 기술은 진동내구 관련 부품의 신뢰성을 높일 수 있는 중요한 시험 방법이라 판단된다.

후 기

이 논문은 산업자원부에서 주관하는 표준화기술개발사업의 성과 내용으로 관계자분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Kim, C. -J., 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.  
 (2) Kim, C. -J., Bae, C. -Y. and Lee, B. -H.,

“Verification on Damage Calculating Method of Vibration Fatigue Using Uni-axial Vibration Test” , 2006, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 521 ~ 528.

(3) Newland, D. E., “An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis” , 2nd edition

(4) Jeffrey N. Fletcher, Havard Vold, Mark D. Hansen, 1994, “Enhanced Multiaxial Control Using a Robust Generalized Inverse System Matrix” ,

Proceedings-institute of Environmental Science, pp. 418 ~ 426.

(4) Grenier, G. C., 1993, “Fatigue Damage Assessment of Vibration Test Exaggeration Methods” , SAE 930402.

(5) Tommy J. George et. Jermy Seidt, M.-H. Herman Shen, Theodore Nicholas, Charles J. Cross, 2004, “Development of a Novel Vibration-based Fatigue Testing Methodology” , International Journal of Fatigue, Vol 26, pp 477 ~ 486.