

# 자동차부품(시트,도어) 6축 진동 재현을 위한 가진 프로파일 생성 기법 Generation of the Input Profile for Fatigue Vibration Testing in MAST System

김찬중\* · 백경원\*\* · 이봉현\*\*

Chan-jung, Kim, Gyoung-won, Beak, Bong-hyun, Lee

Key Words : Vibration Fatigue, MAST(Multi Axis Simulation Table), Energy Method, Optimal Algorithm.

## ABSTRACT

Vibration test using the MAST(Multi Axial Simulation Table) is more reliable test than conventional testing process focused on one directional vibration test. The former test could be possible with a advanced control algorithm and hardware supports so that most of the operation is automatically conducted by MAST system itself except the input information that is derived from the measured data. That means the reliability of the vibration test is highly depended on the input profile than any other cases before. In this paper, the optimal algorithm based on energy method is introduced so that the best combination of candidated input PSD data could be constructed. The optimal algorithm renders time information so that the vibration fatigue test is completely possible for any measured signals one wants. The real road test is conducted in short intervals containing some rough roads and the candidated input PSD is obtained from the extra road in proving ground. The testing is targeted for the electronically operated door and seat.

## 기호설명

$m$	mass
$a$	acceleration
$v$	velocity
$t$	time
$R_x$	auto-correlation function
$S_x$	auto power spectrum
$w$	frequency
$T$	time
$\mathfrak{R}$	laplace transform

축 진동시험의 경우 진보된 시뮬레이션 기술을 기반으로 실제 측정된 응답을 얻어내기 위한 유압 액츄에이터의 제어 신호를 재현하는 과정이기 때문에 사용자의 입장에서는 측정된 신호를 어떻게 가공하여 입력 프로파일로 가진기에 줄 것인가가 가장 중요한 요소이다. 본 논문에서는 측정된 가속도 신호를 바탕으로 입력 가진을 가공하는 방법에 대해 소개하고 있다. 주행시험장의 각 특수로부터 획득한 가속도 신호를 바탕으로 에너지 행렬을 구성한 다음 실제의 도로를 주행하면서 얻어진 측정 데이터를 에너지 행렬을 통해 최적의 상태로 조합시켰다. 또한 계산 과정을 통해 각각의 후보 프로파일의 가진 시간의 정보를 획득한 후 선정된 차량의 도어와 시트에 대해 진동시험을 실시하였다.

## 1. 서론

6축 진동시험은 기존의 단축 시험의 한계를 넘어서서 보다 실제에 가까운 진동 환경을 구현하기 위한 시도이다. 6

## 2. 국내의 관련 법규 분석

현재 국내에서 정해져 있는 자동차 부품 관련 규격은 단축 가진 시험에 한정된 제한적인 규정으로써 공진점 검출 시험, 전달함수 혹은 동등한 가진/응답 관계 함수의 규정 그리고 공진점을 이용한 가진 시험이 명시되어 있다.

국외의 진동 시험 방법은 단축 시험 방법에서 시작해서 실제의 측정 데이터를 사용한 PSD 선도를 통해 다축 가진을 수행하는 단계까지 규격이 개선되어왔다. 최근의 PSD 선도를 이용한 진동 가진 시험은 보다 실제에 가까운 진동 환경

\* 자동차부품연구원 구조특성연구센터  
E-mail : cjkim@katech.re.kr  
Tel : (041) 559-3124, Fax : (041) 559-3286

\*\* 자동차부품연구원 구조특성연구센터

을 만들어진 신뢰성 있는 시험 결과를 도출하려는 시도의 일환이다. 그러나 후자의 경우 진동 입력 프로파일이 각각의 개별 부품에 한정되어 있기 때문에 자동차 실제의 진동 환경을 포괄적으로 표현할 수 없으며 이를 실현하기 위한 중간 단계이다. 아래는 자동차 부품에 관련한 진동 시험 규격을 정리한 것이다.

표 2.1 자동차부품의 진동 시험에 관한 규정

국내 규정	국의 규정
KS R 1034-1991	ASTM D 3580, ASTM D 5112, SAE J1598,
	SAE ARP1974, SAE J2380, JIS D1601
	RS-186-7E, ISO 10326-2, ISO 7096

### 3. 6축가진 시험의 필요성

6축 가진기를 통해 전달함수를 구성하는 경우 대상물의 모델링이 선형화되어 사용자의 접근이 용이한 것은 물론이며 동특성이 반영되어 있기 때문에 진동 가진을 수행하는 과정에서 서로 다른 방향의 공진 현상이 동시에 고려되기 때문에 단축 방향의 시험에서보다 신뢰성을 얻게 된다.

단축 가진 시험과 6축 가진 시험을 비교하기 위해 그랜저 XG 도어를 이용하여 공진점 검출 시험을 수행하였다. 공진점 검출은 6축 가진 시험기를 이용하여 전달함수를 구성한 후 각 방향에 대해 1차 공진점의 정보를 얻었다. 아래는 공진점 검출 시험의 결과이다.

표 3.1 그랜저 XG 도어의 각 방향 공진점

	공진점
X축	25[Hz]
Y축	35[Hz]
Z축	20[Hz]

표 <3.1>에서 알 수 있는바와 같이 각 방향의 공진점이 상이하다. 만약 이러한 시험 물에 대해 단축 가진 시험을 수행한다면 한쪽 방향이 상이한 방향에 영향을 주는 전달함수상의 off-diagonal 요소에 대한 고려가 전혀 없는 상황이다. 그러므로 다축 가진에 의해 보여줄 수 있는 많은 동특성이 단축 가진에서는 고려되지 않기 때문에 다축 가진을 통해서만 실제에 가까운 진동 환경을 만들어낸다.

## 4. 진동내구 시험

### 4.1 진동내구 시험의 목적

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 경우

나 혹은 열에 의해 변형이 일어나는 등과 같은 요소의 경우보다 진동에 의해 피로 damage가 걸리거나 작동에 이상이 생기는 확률이 현저하게 높은 경우이다.

일반적인 내구의 입장에서는 외력에 의해 파손 혹은 피로 damage를 통해 대상물이 더 이상 원래의 기능을 원만하게 수행할 수 없는 경우들을 예측하거나 검증하는 작업이 주요한 내용이었다. 그러나 진동내구 관점에서는 진동을 외력으로 규정하여 동일한 분석을 수행하는 경우뿐만 아니라 진동이나 소음이 발생하여 자동차 수요자들의 승차감을 떨어뜨리는 경우와 같이 높은 기대수준에 부합하는 제품을 생산하기 위한 내구 과정을 포함하게 된다.

진동내구에 관련하여 수행할 수 있는 항목들은 다음과 같다.

#### - Durability test

진동에 의해 구조체의 관성력이 발생하여 응력의 형태로 대상 부품에 영향을 주는 경우이다.

#### - Performance test

대상 부품이 진동 조건하에서 얼마만큼 초기의 성능을 유지할 수 있는지를 알아보는 시험이다.

#### - Buzz, Squeak & Rattle test

진동/소음 관점에서 부품의 성능을 평가하는 요소로 크게는 성능 평가에 포함시킬 수도 있으나 사용자의 안락함 정도에서는 성능과 직접적인 영향이 없기 때문에 별도로 분류하였다.

## 4.2 진동내구 평가 방법

### (1) 활용 가능한 평가 방법

진동내구를 수행하는 과정에서 일반적으로 측정하는 데이터는 가속도 신호이기 때문에 S-N 선도를 그대로 사용할 수 없다. 그러므로 가속도와 변위의 관계를 이용하여 시간영역 혹은 주파수 영역의 응력 PSD 선도를 이용하여 진동에 의한 대상물의 피로 damage를 계산하게 된다.

이러한 계산은 대상체가 모듈 단위의 복합체인 경우 취약 부분을 예측하거나 구조 해석을 수행하는데 많은 노력이 필요할 뿐만 아니라 결과에 대한 신뢰성이 떨어지게 된다. 뿐만 아니라 진동에 의한 성능 저하가 피로 파괴와 같은 전통적인 기계 메커니즘의 범위를 벗어나 나사와 같은 체결 요소들의 헐거워짐에 의한 소음/진동 발생과 같은 quality 문제까지를 다루어야 하는 수준에 도달하였다. 이러한 요소들에 대한 진동내구 시험을 수행하기 위해 에너지 값을 이용한 방법을 개발하였다. 에너지 방법의 경우에는 대상물을 블랙박스로 생각한 다음 입출력 신호를 에너지로 관계 지었다.

### (2) 에너지 방법

가진 가속도를 대상물에 대한 에너지원으로 두고 에너지

단계의 비교를 실시한다. 측정된 가속도를 에너지로 변환하기 위해서 다음의 에너지 표현식이 필요하다.

$$\text{Power} = \frac{dU}{dt} = ma \cdot v \quad (4.1)$$

여기서  $m$ 은 질량,  $a$ 는 가속도,  $v$ 는 속도이다. 측정 위치에서의 질량은 상수 값이므로 이 관계를 주파수 영역에서 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Power}(s) = \frac{m}{2\pi} \times \left[ a(s) * \frac{a(s)}{s^2} \right] \quad (4.2)$$

여기서 \*은 convolution 연산자이다. 속도의 주파수 영역은 다음과 같은 형태로 가속도와 연관성을 지닌다.

$$R_x(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^{\infty} x_r(t)x_r(t+\tau) \quad (4.3)$$

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (4.4)$$

이와 같은 관계에서 아래의 식 (4.5),(4.6)를 이용하면 식 (4.7)을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2}{d\tau^2} (R_x(\tau)) = -R_x(\tau) \quad (4.5)$$

$$\frac{d^2}{d\tau^2} (R_x(\tau)) = - \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_x(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (4.6)$$

$$S_x(\omega) = \omega^2 S_x(\omega) \quad (4.7)$$

그러므로 최종적으로 구현한 식은 다음과 같다.

$$\text{Energy} = \int_0^T \mathcal{R}^{-1} \{ \text{Power}(s) \} dt = \int_0^T \mathcal{R}^{-1} \left\{ \frac{m}{2\pi} \times \left[ a(s) * \frac{a(s)}{s^2} \right] \right\} dt \quad (4.8)$$

### (3) 대상 부품의 선정

모듈 단위의 대상물에 대해 진동내구 시험을 수행하기 위해 그랜저 XG에 장착되는 도어와 시트를 선정하였다. 2가지 대상물은 전자 모듈로 동작이 이루어지는 모델들로 시험을 통해 performance test 및 BSR test가 가능하다.

## 5. 주행시험장 실차시험

### 5.1 시험모드

본 연구소에 보유중인 PG에서 가능한 주행거리 및 속도를 고려한 후 아래와 같은 주행조건에 대해 실차시험을 실시하

였다.

표 5.1 주행시험장에서의 실차주행 시험 모드

#	주행 도로	내 용
1	벨지안로	20-60(km/h) 등속 주행
2	표준악로	20-60(km/h) 등속 주행
3	빨래판로	20-60(km/h) 등속 주행
4	소음발생로	20-60(km/h) 등속 주행
5	자갈길로	20-30(km/h) 등속 주행
6	아스팔트보수로	20-60(km/h) 등속 주행
7	단차로	20-60(km/h) 등속 주행
8	장파형로	20-60(km/h) 등속 주행
9	직선로	20-60(km/h) 등속 주행

### 5.2 측정위치

5개의 측정 위치에 대해 가속도계를 부착한 후 주행시험을 통해 가속도 신호를 검출하였다. 검출된 데이터는 신호처리 과정을 거쳐 6축 가진 입력 reference로 활용되었기 때문에 6축 모션이 잘 재현될 수 있는 3개의 신호를 선택하였다.

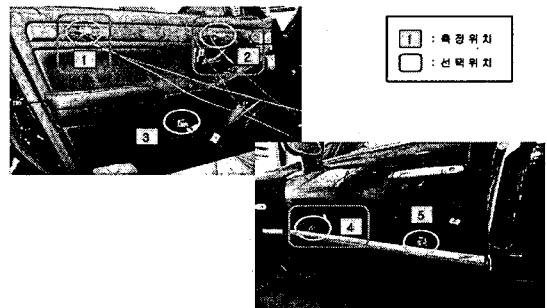


그림 5.1 도어의 측정 위치

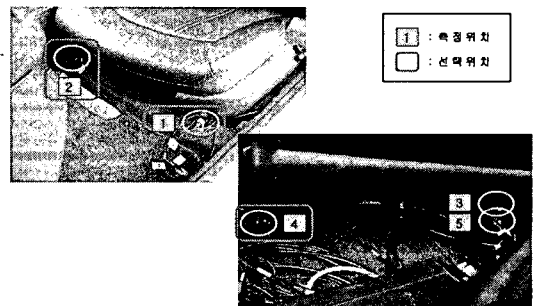


그림 5.2 시트의 측정 위치

### 5.3 신호분석 결과

전체 주파수 대역은 도로의 종류에 상관없이 200[Hz] 미만의 범위에 존재하였으며 영향을 지배적으로 미치는 구간은 저주파 영역의 요소들, 즉 50[Hz] 미만의 주파수 대역에서 나타났다. 측정된 시간 영역의 가속도 데이터들은 주파수 분석(FFT, Waterfall)을 수행하였으나 지면의 한계 상 도시는

생략하였다.

### 5.4 에너지 방법의 선형화 특성 검증

선형화 조건은 에너지 방법을 적용하기 위해 필수적으로 검증되어야 할 사항이다. 선형화 조건이 성립하지 않는다면 하나의 측정 데이터를 다른 측정 데이터와 비교하는 것이나 측정 데이터를 통해 동일한 손상량(damage)을 가지는 또 다른 형태의 가진 입력을 생성하는 일련의 가정들이 신뢰성을 가질 수 없다.

앞서 정립된 시험 절차를 이용하여 동일한 측정 조건에서 에너지를 계산해 본 결과 에너지와 시간의 관계는 아래와 같은 수식 조건으로 선형화되었다. 그림 <>는 각 주행속도에 대한 에너지 변화 값이다.

$$\sqrt{E_1} \times T_2 = \sqrt{E_2} \times T_1 \quad (5.1)$$

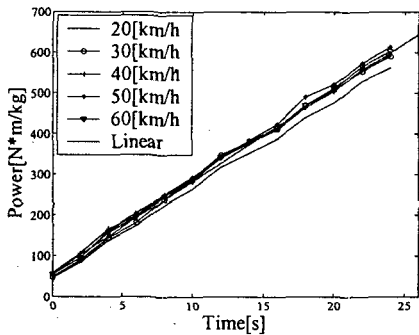


그림 5.3 도어의 에너지 선형성

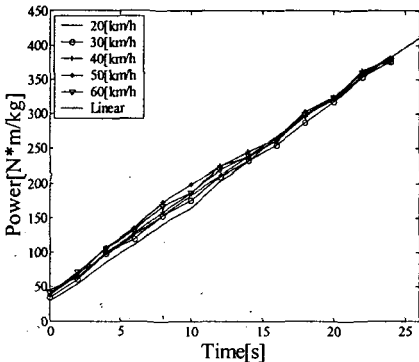


그림 5.4 시트의 에너지 선형성

## 6. 국내 도로의 실차주행 시험

### 6.1 도로주행 시험 모드

본 논문의 주요 과제는 6축 가진 시스템의 입력 프로파일

생성을 위한 것으로 도로주행 시험을 통해서 생성된 입력 프로파일의 가진 시간을 결정하기 위한 것이므로 도로주행 시험 모드의 선정은 큰 비중을 차지하지 못한다. 현재 자동차부품연구원에서 보류중인 실차주행 시험모드를 참고로 상태가 양호하지 못한 국도나 지방도를 포함한 '자동차부품연구원-풍세-광덕산'에 이르는 주행 루트를 선정하여 간단한 도로주행 시험을 실시하였다.

### 6.2 진동특성 해석

측정된 실차 데이터를 주파수 분석한 결과 주행 시험장에서 얻은 결과와 마찬가지로 100[Hz] 내외에서 주요 주파수 대역이 검출되었다. 이 데이터를 주행 시험장에서 얻어진 데이터와 비교해본 결과 유효 주파수 대역이 동일한 양상을 보이고 있기 때문에 유효 주파수 대역에서 서로 다른 특성을 보여주고 있는 특수로의 각 주파수 데이터를 적절하게 조합하여 도로주행을 통해 얻어진 데이터를 구성해내는 것이 가능하다.

## 7. 측정 데이터의 신호처리

### 7.1 측정신호 분석

각 부품별 측정된 주파수 영역에서의 데이터를 에너지 단위로 계산하여 각 특수로 및 속도의 변화에 따라 얻어진 부품의 손상도를 계산하였다. 이 결과는 실차 데이터를 에너지 관점에서 동일하게 재현하기 위한 각 특수로의 입력 프로파일 정보를 형성하는데 기초 자료를 제공한다.

아래는 각 특수로에 대해 정속 주행을 통해 얻어진 데이터들의 에너지 분포이다.

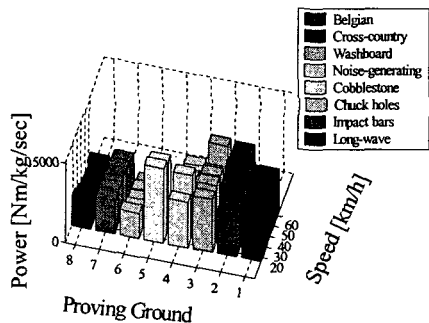


그림 7.1 도어의 에너지 분포도

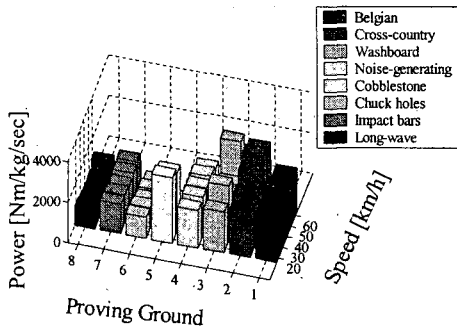


그림 7.2 시트의 에너지 분포도

## 7.2 에너지 행렬의 구성

에너지 행렬은 6축 가진기에 제공되는 입력 프로파일 생성을 위한 에너지 데이터의 변환 과정에 필요하다. 앞서 구성된 도어와 시트에 대한 전체 에너지 구성도를 바탕으로 정규화과정을 통해 전체 크기가 1인 벡터 성분들을 얻어낸다.

## 7.3 최적화 알고리즘

PG 특수로를 통해 얻어진 에너지 행렬(energy matrix)을 바탕으로 실제 측정된 신호를 재구성하는 것은 물론이며 가속화 작업 또한 가능하다. 입력 프로파일을 생성하는 것은 실제 측정된 신호를 각각의 특수로에서 대해 적당한 시간으로 배분하여 동일한 에너지 레벨을 가지는 조합을 찾아내는 것이다.

이러한 일련의 과정을 수행하기 위해 다음의 계산 과정이 필요하다.

- 1) 각 특수로에 의해 만들어진 에너지 행렬의 구성
- 2) 에너지 행렬의 정규화
- 3) 측정된 실제 데이터의 에너지 변환
- 4) 각 특수로의 시간에 대한 첫 번째 경계조건 설정
- 5) 에너지 행렬 및 경계 조건으로 이루어진 통합 행렬 구성
- 6) Moor-penrose inverse를 이용한 시간 정보 도출
- 7) 시간 정보에 의해 구성된 추정치와 실제 에너지 정보의 비교
- 8) 또 다른 경계 조건에 의해 4)~7) 과정의 반복
- 9) 모든 오차 값을 계산한 후 최적 경계 조건 및 시간 정보 도출

이러한 최적화 과정은 수식으로 표현하면 행렬과 가격함수의 관계로 표현된다. 행렬  $A$ 는 각기 다른 특수로에 대해

구성되어 있는 에너지 행렬 값들이며  $B$ 의 경우는  $A$ 를 각 행에 대해 정규화 과정을 거쳐서 단위 벡터들로 구성시킨 전체 행렬을 나타낸다.  $C$ 는 실제 도로에서 측정된 신호들을 에너지 변환을 통해 벡터로 구성한 것으로  $B$  행렬의 각각의 행벡터들을 적절히 조합하여  $C$ 에 근접하는 시간 정보  $\alpha$ 를 얻어내는 것이 궁극적인 목적이다. 그러나 계산 과정에서 단순히 역행렬을 취해  $\alpha$  값을 얻어내는 경우에는 적어도 하나의 요소가 음수의 가능성이 크기 때문에 물리적으로 의미 없는 결론에 도달한다. 그러므로 추가적으로 각각의 시간 정보들에 대해 초기조건을 부여한 후 반복 계산 과정을 통해 적절한 시간 정보들을 도출시킨다. 물론 이러한 계산 과정은 정방행렬이 아닌  $B$  행렬을 이용하기 때문에 근사적인 해만을 구해낼 수 있다.

$$\text{Energy Matrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & \dots & A_{nm} \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{normalize}} [B_1 \dots B_m]$$

( $n$ : number of measured channel,  $m$ : number of PG road)

$$\text{Target Matrix} = \text{transpose}[C_1 \dots C_n]$$

$$[B_1 \dots B_m] \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix}, \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1 \quad \text{Boundary Condition} = 0 \leq \alpha_i \leq 1$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 & \dots & B_m \\ 1 & \dots & 1 \\ \beta_1 & \dots & \beta_m \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{iteration}} \arg \min_{\hat{\alpha}} E \quad \text{for } E = \sum_{i=1}^n |C_i - C_i^*|^2$$

( $+$ : Moor-Penrose Inverse)

(7.1)

## 8. 6축 가진 신호 생성

도로주행 시험을 통해 얻어진 도어의 진동 신호를 이용하여 수치화한 값은 다음과 같다.

표 8.1 도어의 도로 주행 결과 (단위:  $10^{-3}$  Nm/kg/s)

1x	1y	1z	2x	2y	2z	4x	4y	4z
59.2	122.4	83.8	49.2	123.2	86.6	53.9	111.1	106.7

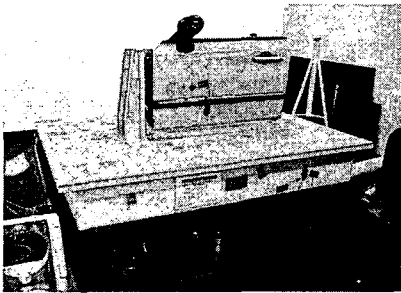
아래는 이러한 에너지 분포를 재현하기 위한 각 특수로의 조합 조건을 보여주고 있다. 시간 정보의 경우 특수로를 한 번 주행한 것을 기준으로 정해진 것이므로 각각의 특수로가 25[s]의 시간동안 주행을 완성한다는 가정에서 6축 가진기에 서의 가진 시간을 도출해내었다.

표 8.2 입력 가진 프로파일의 시간 정보

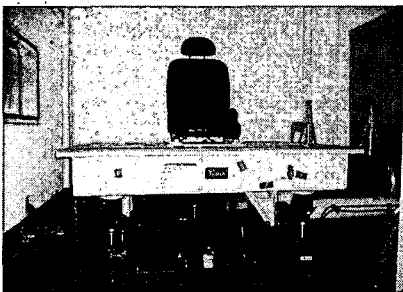
특수로	시간 정보	가진 시간[s]
벨지안로	1.5	36.9
표준악로	13.6	339.3
빨래판로	0.3	7.6
소음로	1.0	23.7
Cobblestone로	0.9	23.1
보수로	0.7	17.3
단차로	7.2	180.7
장파형로	1.8	44.5
주행 모드	30[km/h] 정속 주행	

이러한 진동 조건은 6축 가진을 위한 진동입력 조건일 뿐만 아니라 주행 시험장에서 수행하는 진동내구 주행모드로 사용이 가능하다.

아래는 가진 조건을 이용하여 도어 및 시트 모듈에 대해 6축 진동시험을 수행하고 있는 모습이다.



(a) 도어 모듈



(b) 시트 모듈

그림 8.1 6축 가진기 재현 시험

## 9. 결론

단축 시험의 한계에 머물러있는 국내 자동차부품의 진동 시험을 개선하기 위해 6축 가진기를 이용한 다축 진동시험 방법 중 가장 중요한 요소인 입력 프로파일의 생성 기법에 대해 제안하였다. 본 연구 내용은 에너지 방법을 이용하여 주행시험장의 특수로에 대해서 확보한 PSD 정보를 확보한 후, 이를 이용하여 실제 도로에서 획득한 가속도 신호를 효과적으로 재현하였다. PSD 프로파일들을 최적으로 조합시키기 위해 비 대각 행렬의 역변환으로부터 근사적인 시간 정보를 추출하였으며 이를 이용하여 시험 대상으로 선정된 도어와 시트에 대해 다축 진동시험을 수행하였다. 에너지 방법에 기초한 입력 프로파일 생성은 시험 대상물에 관계 없이 적용할 수 있는 방법으로써 다축 가진 시험의 표준화에 적합하다.

## 후 기

본 논문은 산업자원부에서 주관하는 표준화사업의 성과 내용으로 관계자분들에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) J. S. Lin, Kui-Sun Yim, 2000, "Application of Random Vibration Test Methods for Automotive Subsystem Using Power Spectral Density", SAE 2000-01-1331
- (2) Joe H. Morrill, Thomas Achatz, Abolhassan Khosrovaneh, "An Application for Fatigue Damage Analysis Using Power Spectral Density from Road Durability Events", 1998, SAE 980689
- (3) D. E. Newland, "An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis", 2nd edition
- (4) Grenier, G. C., 1993, "Fatigue Damage Assessment of Vibration Test Exaggeration Methods", SAE 930402