



자동차 소음진동

자동차 부품 6축 진동가진 시험방법 표준화

김 찬 중 · 이 봉 현*

(자동차부품연구원)

1. 머리말

국내의 자동차 부품의 진동 관련 시험은 80년대에 확립된 단축 시험 방법이 현재까지 그대로 이용되고 있으나 일반적으로 실제의 진동 환경보다 매우 가혹한 조건에서 시험이 이루어지고 있기 때문에 시험 결과에 대한 신뢰도가 저하된다. 서로 다른 방향에 대한 상호 작용을 고려한 다축 진동 시험은 기존의 단축 시험의 한계를 극복하기 위한 시도로써, 실제에 가까운 진동 환경을 제공해 주기 때문에 기술 선진국들을 중심으로 많은 연구가 진행되고 있다. 신호처리 및 제어 기술의 축적된 기술을 바탕으로 다축 시험에 적합한 시뮬레이션 장비들이 등장하게 되었고 이를 바탕으로 6축 가진 시험이 자동차 선진 업체를 중심으로 보편화되고 있는 추세이다.

6축 가진 시험은 가진 대상물이 장착되는 가진 테이블을 최소 6개의 가진기를 통해 가진하는 시험 방법으로써 3축 방향의 병진 운동과 모멘트 운동을 동시에 재현함으로써 대상물의 진동 환경을 실제에 가깝게 재현하는 시험 방법이다. 이와 관련된 보편화된 시험 장비는 MAST(multi axis simulation table)로써 유압 액추에이터를 이용하여 진동현상을 재현하고 있다.

국내 자동차 시장의 급부상과 아울러 자동차 부품의 글로벌화는 자동차 관련 부품을 생산하는 업체들에게 기획된 동시에 기술 개발에 대한 요구가 어느 때보다도 필요하게 되었다. 진동 시험이 필요한 관련 부품들의 경우 6축 진동 시험에 관한 기술력이 부족한 관계로 많

은 어려움을 겪고 있으며 초기 성능 대비 내구 성능이 저하되는 국내 자동차 부품의 문제점을 고려할 때 진동 환경에 대한 신뢰성 있는 부품 평가가 가능한 6축 진동 시험에 대한 기술 확보가 절실히 필요한 시점이다.

이 글에서는 MAST 시험 장비와 6축 가진 시험과 관련된 시험 규격, 시험 방법에 대해 설명한 후 국내 실차 주행 시험 데이터를 바탕으로 6축 가진 시험에 필요한 프로파일 생성 방법을 연구하고 있는 자동차부품연구원의 연구내용을 소개하고자 한다.

2. 국내외 관련 법규

현재 국내에서 정하고 있는 자동차 부품 관련 규격은 단축 가진 시험에 한정된 제한적인 규정으로써, 공진 주파수 검출과 전달함수 혹은 동등한 가진/응답 관계 함수의 규정, 그리고 공진 주파수 정보를 이용한 단축 가진 시험이 명시되어 있다.

국외의 진동 시험 방법은 단축 시험 방법에서 출발하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 실제의 측정 데이터를 이용한 다축 가진 시험의 규격이 마련되고 있다. 실제의 측정 데이터를 이용한 다축 진동 시험 방법은 시간 영역 혹은 PSD(power spectral density)를 이용한 주파수 영역에서 신호처리를 통해 실제에 가까운 진동 환경을 만들어 시험 결과에 대한 신뢰성을 극대화하기 위한 최신 기술이다. 단축 시험의 경우 표준화된 시험 규격이 마련되어 있으나 실제 측정 신호를 통한 다축 시험 방법은 대상 부품에 따라 다른 진동 환경을 가지고 있

* E-mail : bhlee@katech.re.kr / Tel : (041) 559-3121

표 1 진동시험 관련 규격

구분	관련 규격
국내 규격	KS R 1034-1991
국의 규격	ASTM D 3580, ISO 10326-2, SAE J1598 SAE ARP 1974, JIS D1601, SAE J2380, ISO 7096, RS-186-7E, ASTM D 5112

기 때문에 규정된 시험 규격도 각각의 대상 부품에 따라 다르다. 또한 실제의 측정 신호도 매우 주관적이기 때문에 같은 부품에 대해서도 해당 업체에 따라 서로 다른 규격을 적용하고 있는 실정이다. 표 1은 진동 시험과 관련한 국내의 규격 제정 현황을 나타낸 표이다.

3. 6축 가진시험 필요성

단축 가진과 6축 가진 시험의 차이점을 도어에 대한 전달함수를 이용하여 설명하고자 한다. 단축 가진의 경우에는 공진점 검출 시험을 통해 전달함수를 얻어내는 과정을 거치고 나서 공진점의 유무에 따라 가진 프로파일을 결정하게 된다. 공진점 측정은 6축 가진 시험에서 전달함수를 구성하는 것과 같은 것으로 시스템의 동특성을 식별해내는 과정이다. 즉, 6축 가진을 통해 얻어진 전달함수는 각 축에 대한 가진을 통해 얻어진 공진점의 정보를 포함하고 있을뿐더러 다른 방향 간에 존재하는 센서와 액추에이터의 상호 관계에 대한 정보를 가지고 있다.

그림 1의 도어에 대한 전달함수들을 통해 각 방향에 대한 공진점이 서로 다르다는 사실을 알 수 있다. 그러므로 실제의 시스템에서 한쪽 방향의 가진은 다른 방향에서 상이한 주파수에 대해 응답을 보이게 된다. 그러므로 단축 가진 시험을 통해 보다 정확한 시험 결과를 얻기 위해서는 각 방향에 대해 공진점 검출 시험을 수행하고 각각의 단축 스펙에 맞게 시험을 수행한다. 그러나 그림 1의 전달함수에서 알 수 있는 바와 같이 한쪽의 가진이 다른 방향의 응답에 영향을 주는 off-diagonal 요소에 대한 고려가 전혀 없는 상태이다. 그러므로 다축 가진에 의해 보여주는 많은 동특성이 단축 가진에서는 고려되지 않기 때문에 다축 가진을 통해서만이 실제에 가까운 진동 환경을 만들어낸다.

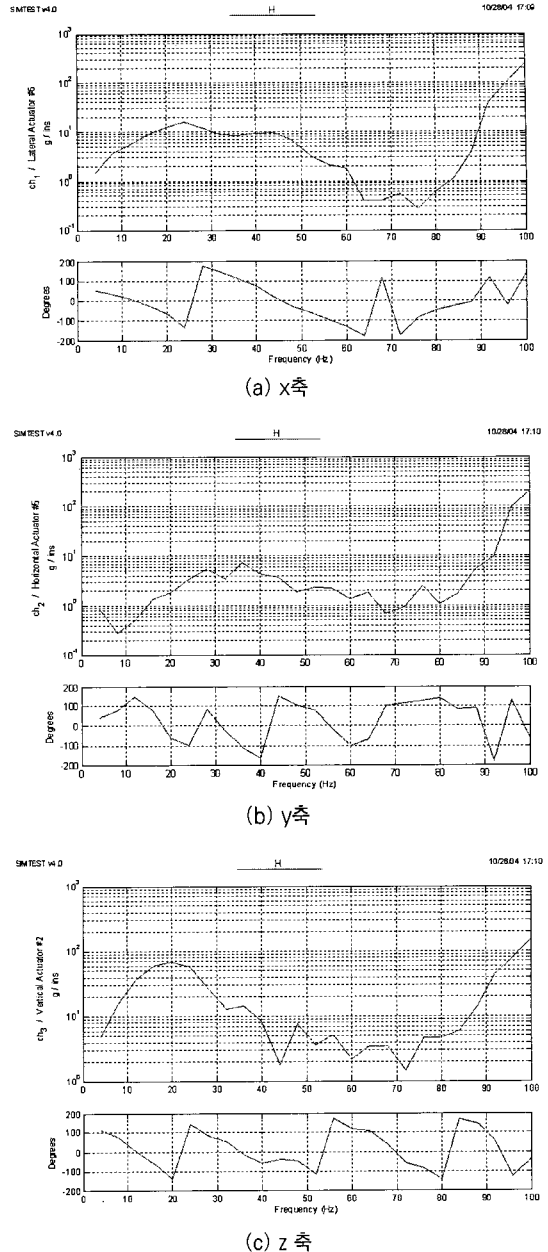


그림 1 도어 3축 방향 공진점 비교

Off-diagonal 요소들이 시스템에 미치는 영향은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 액추에이터가 다른 방향의 응답에 영향을 주는 경우
- 다른 방향의 응답이 측정 방향의 응답에 영향을 주는 경우

- 한쪽 방향의 액추에이터가 다른 방향의 액추에이터에 영향을 주는 경우

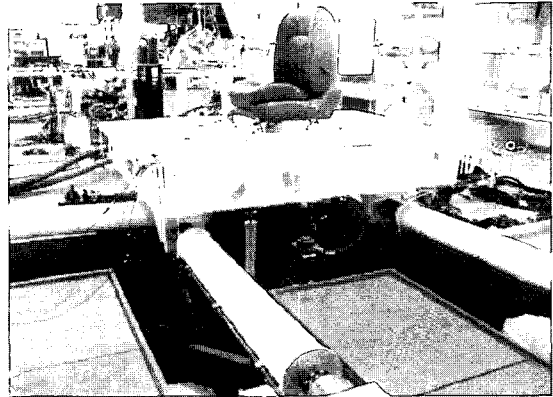
이러한 방향성 고려는 단축 방향만을 통해 재현하기 위해서는 먼저 전체 시스템에 대한 식별을 통해 동특성에 대한 정확한 예측이 필요하며 이러한 해석 결과를 통해 증가의 가진 요소에 대해 동일한 응답을 기대할 수 있다. 그러나 실제의 부품에 있어서 신뢰성있는 예측 자료를 얻을 수 있는 해석 모델의 구성 여부도 불투명한 상황인데다가 이러한 동특성을 알고 있는 상황에서 굳이 하나의 가진이나 응답을 통해 불완전한 가진 시험을 수행할 이유가 부족하다. 과거 단축 시험을 수행하는 목적은 동특성 해석과 관련된 전반적인 기술 수준이 가진 시험을 수행하는데 이용될 정도로 발전되지 않았기 때문이며, SISO(single-input single output)에서 MIMO(multi-input multi-output) 시스템으로 해석 모델을 확장하는 과정에서 많은 기반 하드웨어가 필요한 실제의 가진 환경을 수행하기 어려운 상황이었기 때문에 단축 가진을 통해 매우 큰 안정 계수를 가지는 신뢰성 평가를 수행한 것이다.

4. 6축 가진 시험기

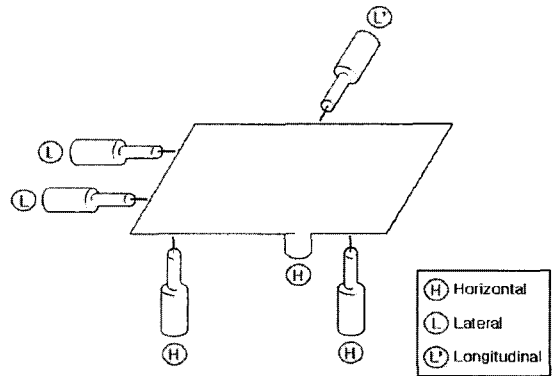
6축 가진 시험기는 단축 가진 작동기(actuator)를 사용하여 가진 테이블 위에 부착된 가진 대상물에 3축 방향의 병진 운동과 이와 관련된 3축 모멘트 성분을 발생시켜 실제의 진동 거동을 재현하는 시뮬레이터이다. 그림 2는 자동차부품연구원에서 보유하고 있는 MAST 장비를 나타낸 사진으로, 6개의 작동기로 구성되어 있다.

6개의 작동기를 통해 하나의 평면을 움직여 측정된 여러 채널의 데이터를 그대로 재현하여야 하기 때문에 센서의 위치에 따라 재현성에 큰 차이가 난다. 주어진 평면의 3축 병진 운동과 3축 모멘트 운동을 통해 가진이 이루어진다는 것과 측정 위치가 각 작동기의 운동과 연관성이 커야 한다는 점을 고려하여 측정 위치를 선정하는 것이 중요하다.

가진 프로파일을 만들어내는 대부분의 알고리즘은 전달함수에 기반을 두고 있으며, 임의의 가진을 통해 전달함수를 획득한 다음 측정 데이터를 통해 가진 신호를 계산해낸다. 계산된 가진 신호는 선형화된 전달함수를 통해 얻어진 정보이므로 현재 보유한 정보를 바탕으



(a) MAST 장비 외관



(b) MAST 작동기 배치도

그림 2 MAST(Multi Axis Simulation Table)

표 2 6축 가진 대상 부품

대상부품	세부 부품
엔진 시스템	Engine, Engine Mount, Cable Connector
연료 장치	Fuel Tank, LPG Bonbe
냉각 장치	Radiator, Thermostat
흡배기 장치	Exhaust Pipe, Muffler
내장 부품	Instrumental Panel
기타	Seat, Door, Frame, A/V Equipment

로 다수의 가진 시험을 수행한 후 실제의 응답 신호와 유사한 응답이 나타나는 가진 신호를 획득하게 된다.

표 2는 6축 가진 시험기를 통해 시험 가능한 자동차 부품을 정리한 것이다.

5. 진동내구

5.1 진동내구 시험분류

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, 열에 의한 변형 보다는 진동에 의해 파손 혹은 피로 손상도(damage)가 발생하여 작동에 이상이 생기는 확률이 현저하게 높은 경우를 뜻한다. 이러한 진동내구 관련 현상들은 정의된 파괴 모드의 종류에 따라 아래의 3가지로 분류할 수 있다.

(1) 관성력에 의한 피로파괴

진동에 의해 구조체의 관성력이 발생하여 응력의 형태로 대상 부품에 지속적인 영향을 주어 결국 피로파괴를 일으키는 경우이다. 진동에 의한 관성력이 입력 가진의 대부분을 차지하기 위해서는 관성력에 의해 시스템 내구에 영향을 주는 부분이 최소 1부분 이상 존재해야 하므로 자동차 부품의 경우 머플러 등이 여기에 포함된다.

(2) 성능 저하에 따른 파손

대상 부품이 진동 조건 속에서 초기의 성능이 저하되다가 정의된 성능한계를 넘어서 결국 파손으로 판단되는 경우이다. 성능 평가가 이루어지기 위해서는 어떠한 거동을 성능 평가의 관점으로 이용할 것인지를 사전에 결정해야 한다. 평가 기준이 마련된 다음 초기 대상 부품의 성능을 측정 후 가진 후의 데이터와 비교하여 당사 간에 규정한 한계 범위 안에 들어오는지의 여부에 따라서 시험의 합격 여부를 판단한다.

(3) Buzz, Squeak & Rattle (BSR) 파손

소음/진동 관점에서 부품의 성능을 평가하는 시험 방법으로 크게는 성능 평가에 포함시킬 수도 있으나, 사용자의 안락함 정도를 판별하는 것이 주목적으로 성능과는 직접적인 영향이 없기 때문에 별도로 분류하게 된다. 소음/진동의 관점에서는 안정성에 직접적인 영향을 주지 않기 때문에 과거의 진동 내구 분야에서 중요한 연구 내용이 아니었으나 원하지 않는 에너지 형태의 표현이기 때문에 시스템의 안정성에 영향을 주는 요소

로 발전할 가능성을 충분히 가지고 있다.

5.2 진동내구 수행 방법

(1) 시간 영역의 피로 손상도 계산 방법

시간 영역의 피로 손상도 계산 방법은 시간 영역의 응력을 이용하여 손상도를 계산하는 것으로 피로해석의 이론에 기초한 피로 손상도 계산 방법이다. 시간 영역에서 계산 방법은 peak-holding, level crossing, simple range counting 등이 있으며 응력-변형률의 폐쇄히스테리시스 루프를 고려한 rain-flow counting 기법이 현재 가장 일반적으로 쓰이고 있는 방법이다. 아래 그림 3은 rain-flow counting 방법에 대한 개략도를 나타낸 그림이다. 그림 3에 소개된 시간 영역의 손상도 계산 방법은 일반적인 응력/변형률에 대한 측정 데이터를 통해 대상물의 피로 손상도를 계산하는데 효율적인 방법이지만 진동내구 입장에서는 측정 데이터의 형태가 천이 응답, 불규칙 하중원에 의한 오랜 시간의 가진, 그리고 다중 진동원에 의한 복합 가진 등과 같은 응답 형태가 예상되기 때문에 활용도가 낮다.

(2) PSD 선도를 이용한 방법

PSD(power spectral density) 선도를 이용한 피로 손상도 계산 방법은 시간 영역의 계산 방법 적용이 용이하지 않는 진동 환경에 대한 해결 방법으로 개발되었다. 주파수 대역 접근 방법의 근간에는 확률론으로부터 파생된 spectral moment가 중요한 역할을 한다. n 차의

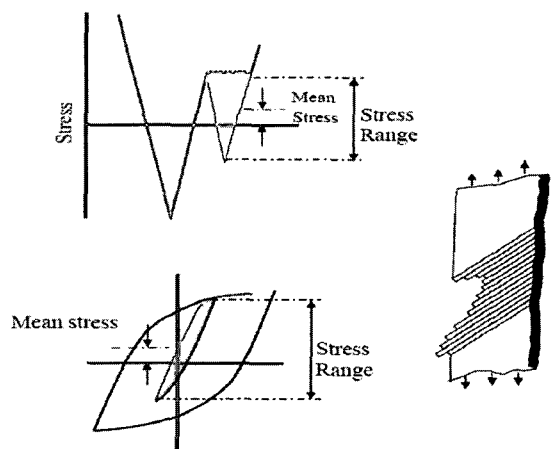


그림 3 Rain flow counting 방법

spectral moment는 식 (1)로 표현된다.

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n \cdot G(f)df = \sum f_k^n \cdot g(f) \delta f \quad (1)$$

여기서 f 는 해당하는 주파수, $G(f)$ 는 이에 따른 스트레스의 PSD이다. 이 방법은 주파수 영역의 PSD 선도를 이용하기 때문에 분석 데이터의 크기가 작고 계산 과정에서 전달함수를 이용하기 때문에 시스템 동특성과 관련된 추가적인 목적을 이룰 수 있다.

PSD 선도를 이용한 계산 방법은 전달함수를 이용하기 때문에 선형화에 따른 오차를 무시할 수 있는 시스템 및 측정 데이터가 정상적(stationary)인 경우에만 적용이 가능하다. 또한 확률론에 바탕을 두고 있으므로 주요 주파수 성분의 분산이 큰 경우에는 실험식에 의한 보정이 필수적이다. 그림 4는 피로 손상도 계산 방법에 대한 시간 영역과 주파수 영역의 계산 방법을 비교한 것이다.

(3) 에너지 방법을 이용한 방법

앞서 언급한 2가지 방법은 진동내구 시험이 필요한 모듈 단위의 자동차 부품에 적용하기가 곤란하다. 모듈 단위의 대상물은 복잡한 구조에 의해서 취약 부분의 선정이 어렵고 측정된 신호가 대상물의 내구 환경을 충분히 대표할 수 있다고 볼 수 없다.

모듈 단위의 복잡한 구조물에 대한 진동내구 시험을 수행하기 위해 에너지 방법을 이용한 피로 손상도 계산 방법이 개발되었다. 대상 부품이 복합적인 요소로 이루어져 있기 때문에 시스템 자체는 미지수로 두고 입력 가진 신호만을 고려하여 에너지 값을 획득하고 피로도 지수로 나타낸 것이다.

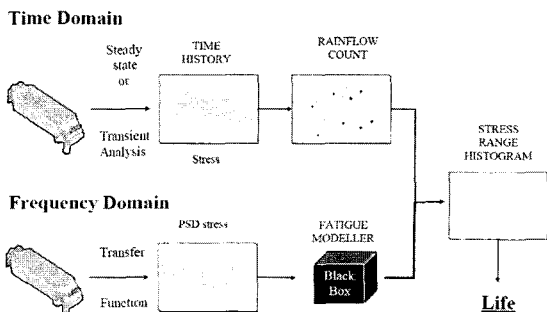


그림 4 피로 손상도 계산 방법의 비교

6. 6축 가진 프로파일 생성

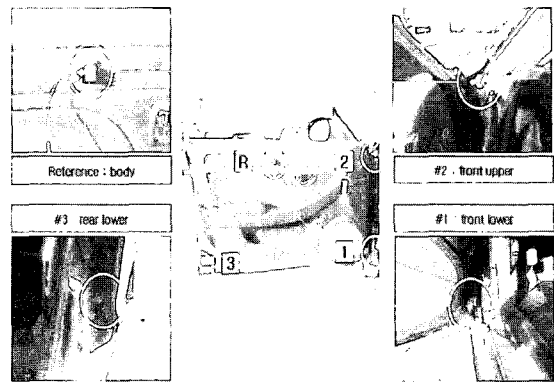
6.1 대상 부품의 선정

실차 상태 부품의 진동데이터를 획득하여 6축 시험기용 가진 프로파일을 생성하기 위하여 이 연구에서는 승용차용 도어와 시트를 선정하여 실차주행시험을 수행하였다.

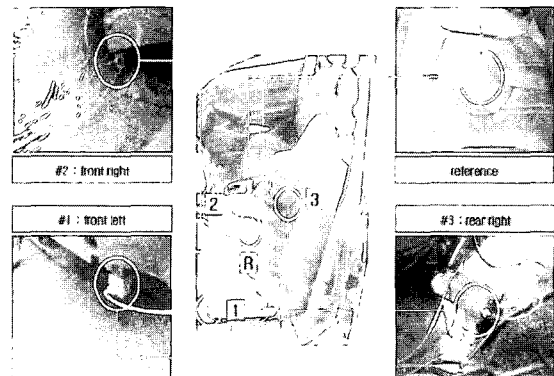
그림 5는 실차 주행시험 시 도어와 시트에 장착한 가속도계의 위치를 나타낸다. 그림 5(a)와 같이 도어는 도어 고정용 프레임에 3개의 가속도계를 설치하였으며, 도어 중앙에 보정용 가속도계를 설치하였다. 그림 5(b) 시트의 경우 볼트 체결 부위 3곳에 가속도계를 설치하였으며, 운전자 엉덩이 부분에 시트 가속도계를 설치하였다.

6.2 국내도로 주행 시험

시험에 사용된 차량은 국내에서 생산된 배기량 2,500



(a) 도어 측정위치



(b) 시트 측정위치

그림 5 실차 주행시험 계속 시스템



(a) 지방도 주행시험



(b) 비포장로 주행시험

그림 6 실차주행시험 사진

cc의 중형 승용차를 선정하여 도어 및 시트의 진동신호를 측정하였다. 그림 6은 실차주행시험을 수행하는 장면을 나타낸 사진이다.

노면의 조건에 따른 진동시험을 실시하기 위해 고속도로, 국도, 지방도 및 비포장로에 대해 주행시험을 실시하였으며 국내 운전자의 주행 성향을 고려하여 표 3과 같이 주행거리를 선정하여 시험을 실시하였다. 그림 7은 이 연구에서 수행한 전체 주행경로를 나타낸 사진으로 천안에서 출발하여 경주를 지나 동해안을 걸쳐 서울까지 주행하는 전체 경로를 나타낸 그림이다. 그리고 비포장로에 대한 데이터를 획득하기 위하여 광덕산의 산악지역을 선정하여 주행시험을 수행하였다.

그림 8은 고속도로 주행 시 얻은 시트의 진동데이터에 대한 전체적인 PSD 선도를 나타낸 그림이며, 이외의

표 3 국내도로 주행시험 주행거리

도로 구분	세부구간	주행 거리(km)
고속도로 (경부)	천안-금강 휴게소	104
	금강 휴게소-김천 IC	
	김천 IC-건천 휴게소	
국도 (7번)	경주 IC-호계	278
	호계-경주 IC	
	경주 IC-포항시내	
	포항시내-국도 진입	
	포항-영해	
	영해-원덕	
	원덕-삼척	
국도 (38번)	삼척-태백	150
	태백-사북	
지방로(421번)	사북-물운	150
지방로(424번)	물운-정선읍	
국도(59번)	정선읍-정선군	
국도(42번)	정선군-평창시내	21
비포장로	면은-금당계곡	
	금당계곡-도로 끝	
	도로 끝-면은	
서울시내	양재-수서-잠실-강남	40
	반포-종로-한남대교	
비포장로	광덕사-산 중턱	4.6
총 주행거리		739.6

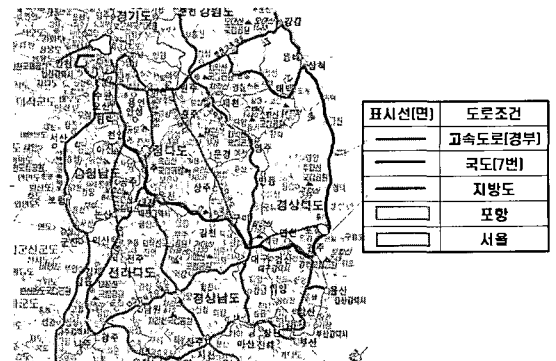
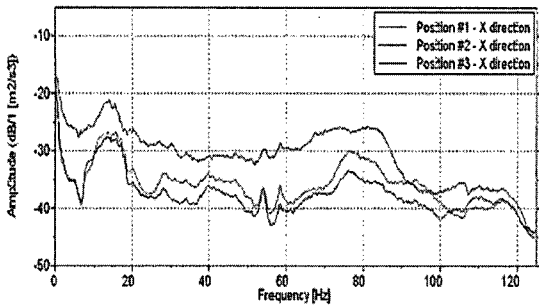
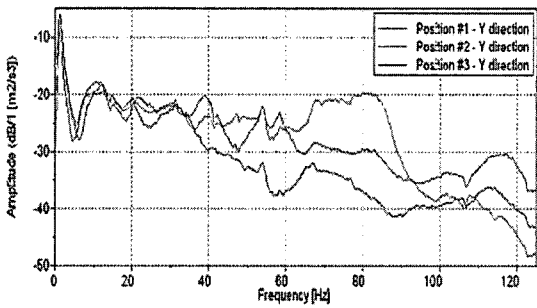


그림 7 국내도로 주행시험 전체 경로

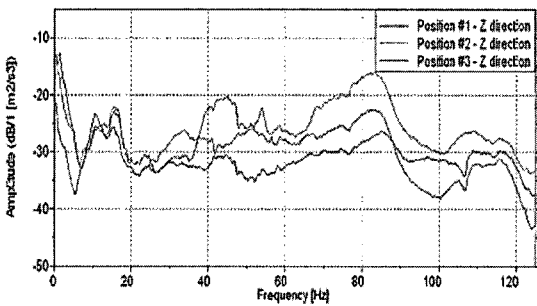
도로에 대해서도 유형별로 각각의 PSD 선도를 얻을 수 있다.



(a) 측정위치 #1



(b) 측정위치 #2



(c) 측정위치 #3

그림 8 시트 실차주행시험 데이터 PSD 선도

6.3 주행 시험장 주행 시험

국내도로 주행 시험을 통해 얻어진 진동 데이터를 6축 가진기에서 효율적으로 나타내기 위해 동일한 측정 조건으로 주행 시험장의 각 특수로에 대해 진동시험을 수행하였다. 일반적으로 차량의 내구성을 평가할 때 도로 주행을 통한 내구시험, 주행시험장에서의 내구시험 및 실험실내에서의 내구시험으로 구분할 수 있는데, 도로 주행을 통한 내구시험이 가장 정확하지만 수개월에서 수년의 시간이 소요되므로, 개발차량의 주기를 단축하기 위해서는 실험실내에서 내구시험을 수행하기 위한 초가속 내구시험모드를 선정하여야 한다. 그러므로 실

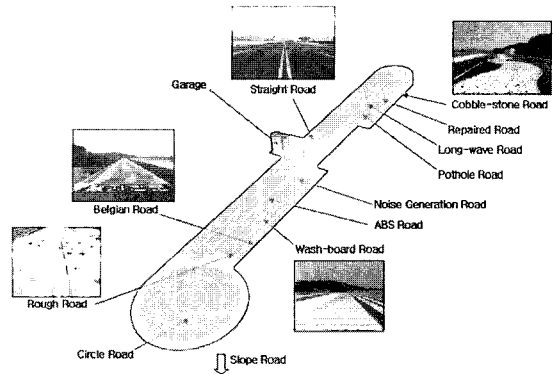
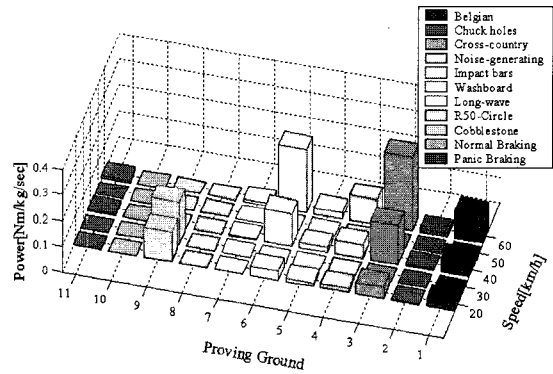
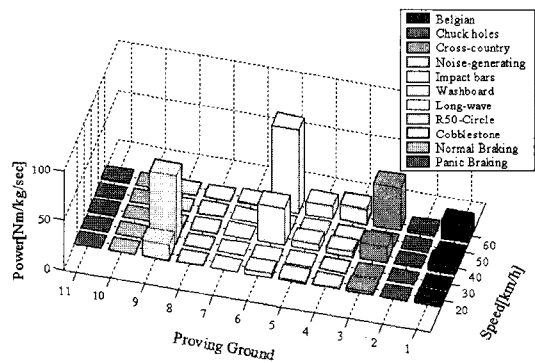


그림 9 자동차부품연구원 주행시험장



(a) 도어



(b) 시트

그림 10 에너지 값 분포도

차에서 측정된 데이터와 동일한 손상도를 갖는 프로파일 생성하기 위하여 주행시험장 내의 진동데이터를 사용하여 6축 장비용 가진 프로파일을 생성하게 된다. 그림 9는 자동차부품연구원이 보유중인 8개의 특수로

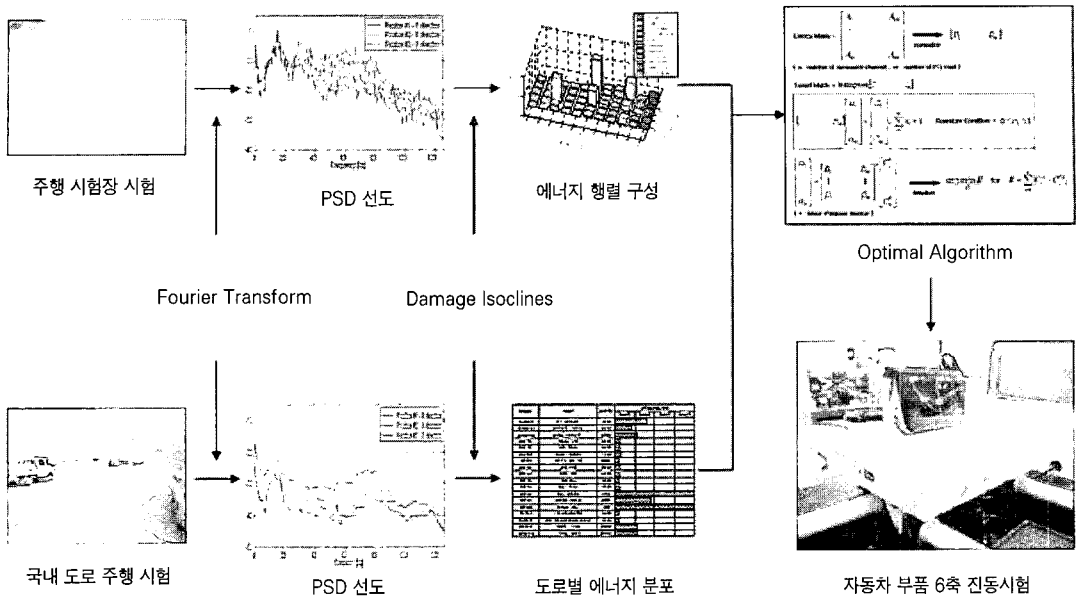


그림 11 자동차부품 6축 가진시험 프로세스

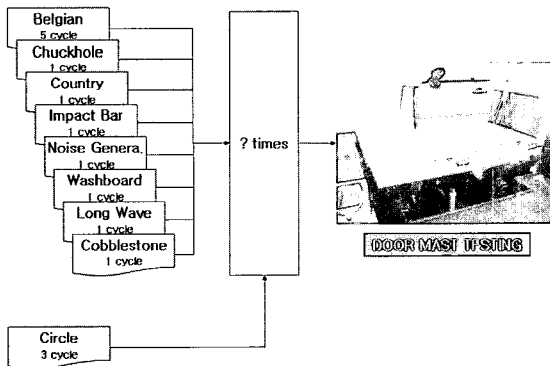


그림 12 도어에 대한 6축 가진모드

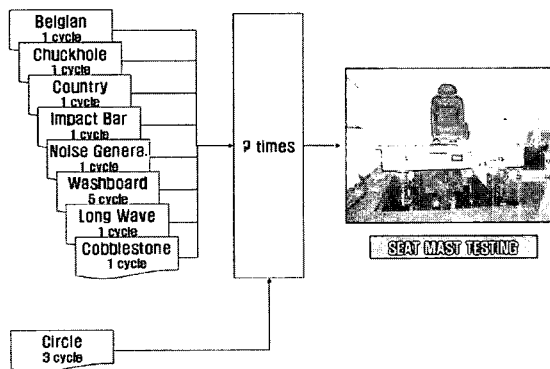


그림 13 시트에 대한 6축 가진모드

및 선회로와 직선로에 대해 나타낸 그림이다. 이와 같은 주행로에 대해 획득한 진동 신호를 각각의 대상 부품에 대해 에너지 값으로 변환한 결과를 그림 10에 나타내었다.

주행시험장의 측정 신호를 통해 국내도로 전 구간을 통해 얻어진 데이터를 등가적으로 표현하는 것은 6축 가진기의 가진 프로파일을 생성하는데 유용할 뿐만 아니라 가속진동시험을 가능하게 하기 때문에 장점이 많다. 각 특수로의 PSD 선도는 대상 부품의 진동 시험에 사용될 대표 PSD 선도로 선정하였다.

6.4 6축 가진 시간 정보


주행시험장 데이터를 이용하여 확보된 에너지 분포를 기준으로 실제 도로시험에서 계측된 에너지 값을 최대한 동일하게 재현하는 것이 중요하다. 그림 11은 주행시험장과 국내 도로주행을 통해 얻은 가속도 데이터를 이용하여 6축 가진기용 가진 프로파일을 나타내는 전체 프로세스를 나타낸 그림이다.

주행시험장을 통해 계산된 특수로 노면의 에너지 값들은 서로 다른 입력 가진에 의한 응답 성분이므로 적절한 조합을 통해 그림 12와 13과 같은 도어와 시트에 대한 진동내구시험용 가속조건을 도출할 수 있다.

7. 맺음말

이 글에서는 자동차 부품에 관한 6축 가진 시험 방법을 소개하였다. 국내의 관련 법규에 대해 살펴보았으며 6축 가진 시험기에 대한 내용과 관련성이 있는 대상 부품을 알아보았다. 진동내구는 진동 시험에 관한 포괄적인 개념으로써 효과적인 진동 시험 규격 제정을 위해서는 진동내구와 관련된 파괴모드 정의와 수행 방법에 대한 숙지가 반드시 요구된다.

국내의 자동차부품 관련 진동 규격은 단축 시험으로 한정되어 있기 때문에 다축 진동 시험에 관한 규격 제정이 절실한 시점이다. 선진 자동차 부품 업체들이 6축 진동시험을 포함한 다축 진동시험에 대해 자체 규격 제정을 통해 경쟁력을 확보하고 있기 때문에 국내에서도 관련 기술 습득을 통해 제반 환경을 구축해 나가야 한다. 국내 6축 가진 시험의 표준화에 관한 연구가 진행 중인 자동차부품연구원의 기술성과를 소개함으로써 관련 업체들간의 정보 공유는 물론 국내 경쟁력 강화에 도움이 되고자 한다. 기 개발된 내용을 바탕으로 관련 업체들이 컨소시엄을 구성하여 표준 규격을 제정한다

면 국내 자동차 부품의 내구 성능 향상에 이바지할 것으로 예상된다. 

참고문헌

- (1) 김찬중, 이봉현, 김기훈, 2005, "자동차부품 6축 진동 재현을 위한 가진 프로파일 생성 기법", 한국소음진동공학회논문집, 제 15권, 제 9호, pp. 1070~1076.
- (2) 김찬중, 백경원, 이봉현, 2005, "자동차부품(시트, 도어) 6축 진동 재현을 위한 가진 프로파일 생성 기법", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 413~418.
- (3) 이봉현, 2006, "자동차부품 6축 진동시험평가방법 표준화", 표준화기술개발사업보고서, 산업자원부.
- (4) Bishop, N.W.M. and Sherratt, F., 1989, "Fatigue Life Prediction from Power Spectral Density Data", Environmental Engineering, Vol.2, Nos. 1 and 2.
- (5) Bendat, J. S., "Random Data Analysis and Measurement Procedures", Third edition, Wiley Interscience.

□ □ □ ■ 학회 행사 안내 □ □ □ ■

※ 2006 춘계 소음진동 학술대회 (New Horizon of Noise and Vibration)

• 2006년 5월 25~26일(목, 금) / 라마다제주호텔

※ 수송기계의 소음진동 저감 기술 세미나 (수송기계분과)

• 2006년 6월 9일(금) - 자세한 내용 추후 공지