

유압식 6자유도 가진 테이블을 이용한 자동차부품 내구성능 평가 기술

Durability Performance Evaluation of Automotive Components Using Hydraulic 6 Axis Simulation Table

최규재
G. J. Choi

1. 서론

자동차의 차체는 주행 중 전후, 좌우, 상하방향의 병진 운동과 각 축에 대한 회전 운동 등 6자유도의 운동을 받는다. 그림 1에 나타난 바와 같이 자동차의 운동에 따라 자동차에 탑재되는 운전석(cockpit), 의자(seat), 연료탱크, 라디에이터, FEM(front end module) 등의 부품 및 모듈 등은 6자유도 운동을 받으면서 각 부품의 기능을 수행하고 있다. 이들 부품은 자동차의 내구수명 동안 아무런 문제없이 제 기능을 발휘해야 하며 파손되거나 기능 저하 등이 발생하지 않아야 하는 등 내구성능이 중요한 지표로 등장하고 있다. 이와 같이 자동차부품의 내구성능은 자동차에 있어서 중요한 성능 중의 하나이다. 이 성능은 자동차가 생산되어 차량 수명이 다하는 기간 동안 고장이나 파손 등 성능의 저하없이 제 기능을 발휘할 수 있는 지 여부에 대한 성능으로 자동차 평가 시 중요한 요소로 사용되고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 국산 자동차에 대한 초기품질은 세계 최고 수준에 이르고 있지만, 내구성능은 하위권에 머무르고 있는 실정이다(그림 3).

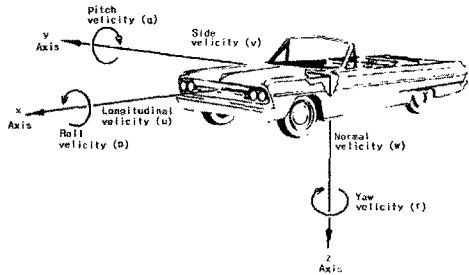


그림 1 차량 운동 자유도(SAE)

따라서 내구성능 확보가 시급히 요구되고 있는 사항이며 유압식 6자유도 가진 테이블을 이용한 다축 진동내구시험은 자동차 기술 선진국에서 이미 보편

적으로 사용하고 있는 진동내구시험방법이다. 국내에서도 일부 완성차 업체와 자동차부품 생산업체들이 유압식 6자유도 가진 테이블을 도입하여 진동 내구 시험을 실시하고 있으며 향후 활용도가 더욱 높아질 전망이다.

본 해설에서는 자동차 부품의 6자유도 진동내구시험 평가를 위한 과정과 함께 자동차 샤시부품 내구성능 평가 장비를 보유하고 있는 군산대학교 자동차 부품기술혁신센터(KATIC)²⁾의 6자유도 진동내구시험평가 적용 사례에 대하여 기술하였다.

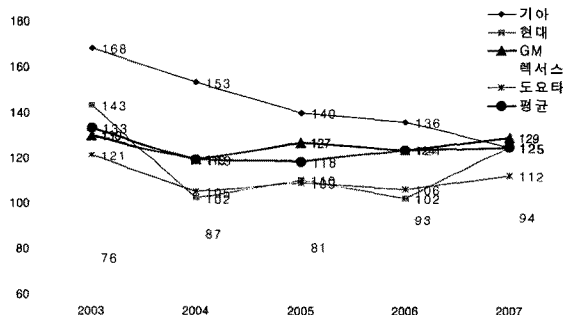


그림 2 자동차 초기품질지수(IQS) 평가 결과1)

**J.D. Power and Associates
2007 Vehicle Dependability Study™ (VDS)**

**2007 Nameplate Ranking
Problems per 100 Vehicles**

Brand	Problems per 100 Vehicles
Buick	145
Lexus	145
Cadillac	162
Mercury	169
Honda	169
Toyota	178
BMW	182
Lincoln	182
Gibson	182
Oldsmobile	190
Jaguar	197
Acura	207
Mercedes-Benz	212
Infiniti	215
Industry Average	219
Jeep	219
Pontiac	220
Volvo	220
Porsche	221
Subaru	222
Chevrolet	228
Hyundai	228
Nissan	228
Vauxhall	230
Audi	234
Dodge	239
HUMMER	242
Mini	245
Chrysler	246
Porsche	252
Nissan	274
Saturn	274
Kia	274
Mazda	280
Volkswagen	280
Subaru	280
Isuzu	310
Suzuki	322
Land Rover	322
Industry Average	300

그림 3 자동차 내구품질지수(VDS) 평가 결과1)

2. 자동차부품 6자유도 진동내구시험평가

최근 모든 산업 분야에서 소비자의 요구와 권리가 커지고 제품의 내구성이 강조됨에 따라 신뢰성 개념을 도입한 제품의 설계와 평가의 중요성이 날로 증대되고 있다. 신뢰성이란 제품을 구성하는 재료, 부품, 제품이 고장 혹은 오류 없이 운용될 가능성의 정도를 나타내는 정성적 기준을 나타내며, 이러한 신뢰성 평가를 통해 미래의 품질이나 고장을 예측하고 보증할 수 있다.

자동차 부품에 있어서의 신뢰성 평가 방법은 자동차 운행 기간 동안 발생할 수 있는 다양한 하중이력을 이용한 내구성능시험이 사용된다. 그림 4에 나타난 바와 같은 다양한 내구성능시험을 통해 자동차업체와 부품업체는 예상되는 하중 이력에 대해 충분히 견딜 수 있는 제품을 최적설계하고 있다.

국내에서 자동차가 주행하는 도로는 주행성능 및 관리등급에 따라 고속국도, 일반국도, 지방도, 시가지로, 기타 등으로 구분할 수 있다. 이들 도로 중 고속국도를 제외한 도로들은 자동차가 주행하기에 적합하도록 포장된 것과 비포장 구간으로 구분되며 시가지에 설치된 도로도 자동차의 고속 주행을 위한 자동차 전용도로와 일반 주행용 도로로 구분된다. 자동차의 주행 하중이력은 이들 도로를 주행함으로써 얻을 수 있으나 매년 모든 시험차량에 대해 장시간의 시험운전을 반복할 수는 없다. 따라서 이들 하중이력과 대등한 조건을 갖는 대표성있는 하중이력을 추출하고 이를 반복적으로 검증할 수 있는 시험도로가 필요하다. 이와 같은 역할을 수행하는 도로가 특수로를 포함하는 주행시험장이며 벨지안로(Belgian road)를 포함한 다수의 특수로와 주행성을 확인할 수 있는 직선 주행로를 포함하는 시험로를 건설하여 사용하고 있다. 따라서 이들 시험로가 실제 도로 하중과 어떤 상관관계를 가지고 있는가에 대한 규명 작업이 있어야 하며 이로부터 얻은 시험로의 실제도로에 대한 특성이 시험로의 가혹도가 된다.

가속주행 내구시험은 실제의 도로를 자동차 수명 기간 동안 주행하며 받게 되는 손상도와 동일한 값으로 시험로를 통해 사시부품에 손상을 가하며 시간을 단축하는 시험방법이다. 그러나 이 방법은 시험차량이 만들어진 이후에 가능한 것으로 단위 부품 또는 모듈 부품 상태에서 실시하는 것은 불가능한 일이다. 따라서 부품 설계자는 실제 도로 주행 내구 손상도와 동일한 값을 갖도록 신뢰성 높은 유압식 전

용 시험기를 이용하여 하중 작용을 모사한 조건으로 부품에 대해 내구 신뢰성 시험을 실시한다.

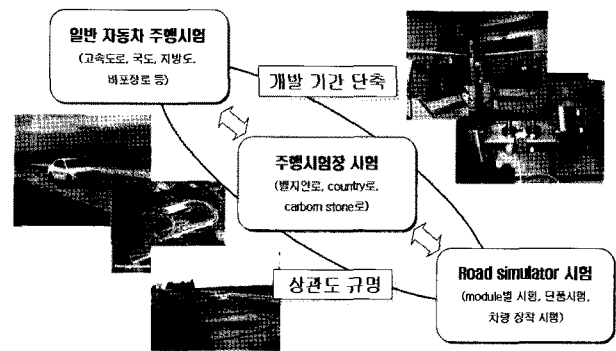


그림 4 자동차부품 내구시험평가 방법

차량에 탑재되는 부품 및 모듈이 받게 되는 진동은 전술한 바와 같이 6자유도이지만 기존에 많이 사용되는 단축 진동 내구시험방법은 실제 운전 중에 나타날 수 있는 현상들을 모두 포함하지 못하는 한계가 있어 신뢰성 확보에 제한적이다. 따라서 단축시험(1 자유도 시험)에 의해서는 평가가 불가능한 실정이며 실제 주행 상황을 재현할 수 있는 6자유도 진동시험 평가방법이 도입되고 있으며 각종 자동차 부품시험에 적용되고 있다.

2.1 유압식 6자유도 진동내구시험기

다축 시험기를 이용한 진동 내구시험이란 차량이 주행할 때 노면으로부터 받게 되는 하중을 유압시험기를 이용하여 시험실에서 유사하게 재현하는 시험기법을 말한다. 이와 같은 내구시험은 실차 시험에 비해 비용과 시간을 현저하게 감소시킬 수 있으며, 특히 시험의 재현성이 우수하기 때문에 그림 5와 같은 6자유도 가진 테이블을 이용하여 차량 각 부(엔진, 배기시스템, 시트, 연료탱크, FEM (front end module) 등)의 진동을 재현하면서 내구시험평가를 수행할 수 있다. 그림 5에는 군산대학교 자동차부품기술혁신센터(KATIC)에서 보유하고 있는 MTS사³⁾의 6자유도 가진 테이블(MAST, Multi-axial Simulation Table)을 나타낸 것이며, 시험기의 사양을 표 1에 기술하였다. 이 시험기는 680kg의 중량을 올려놓고 최대 50Hz까지 6자유도 재현 시험이 가능한 유압시험 장비이다. 그림 6에는 유압식 6자유도 가진 테이블의 시스템 구성도를 나타낸 것이며 그림 7에는 테이블 가진을 위해 설치된 액츄에이터의 연결부를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 6자유도 운동 상호 간에 간

섭이 발생되지 않도록 시험기를 구성하는 것이 필요하며 50Hz까지의 빠른 응답을 얻을 수 있도록 시스템이 구성되어 있다. 그림 8에는 각 액추에이터 구동 회로와 서보 밸브 유로를 도시한 것이며, 그림 9에는 전체 시스템에 유압을 공급해 주는 유압공급장치(HPU)를 도시한 것이다.

표 1 6자유도 가진 테이블 사양

Item	Specification
Motion	6 degrees of freedom
Pay load	680kg
Table dimension	1524 mm x 1828 mm
System acceleration	Vertical: 49m/s ² , Lateral: 32m/s ² Longitudinal: 23m/s ²
Stroke	Vertical, Lateral, Longitudinal: ±75 mm
Velocity	Vertical: 70cm/s, Lateral: 100cm/sec, Longitudinal: 70cm/s
Frequency	0~50Hz

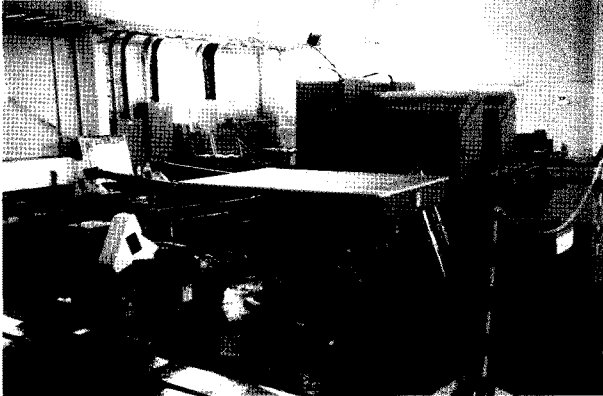


그림 5 6자유도 가진 테이블(MAST)²⁾

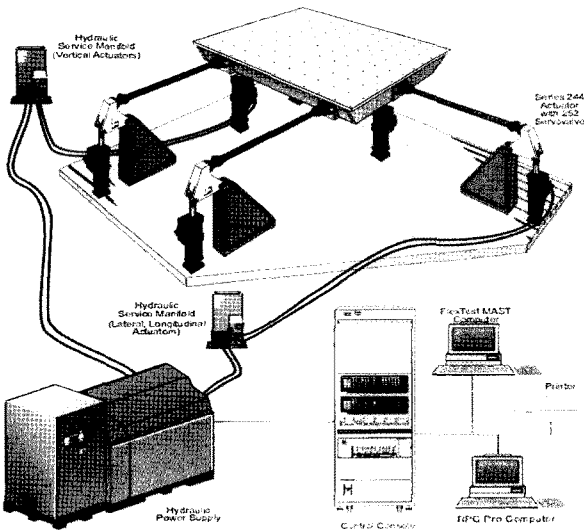
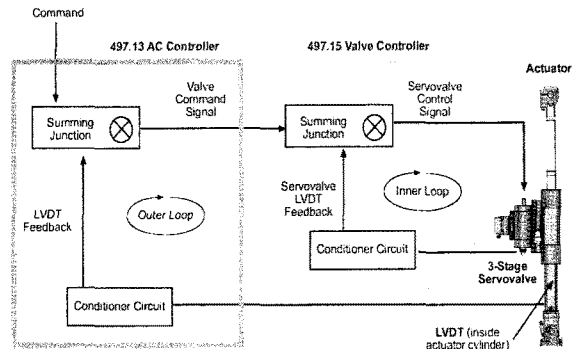
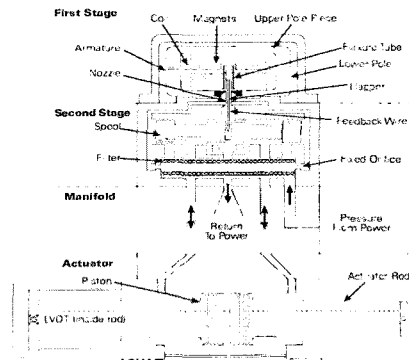


그림 6 6자유도 가진 테이블 시스템 구성도



(a) Actuator 구동 회로



(b) Servo Valve

그림 8 Actuator 구성도

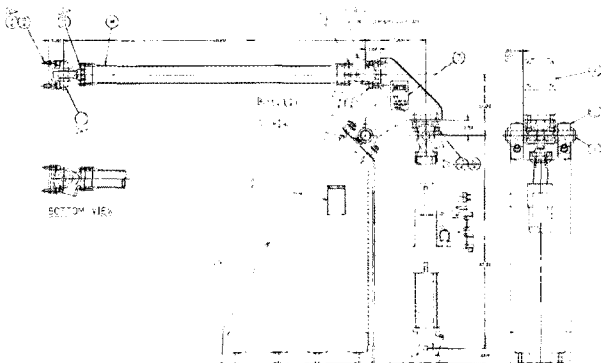


그림 7 Actuator 연결부

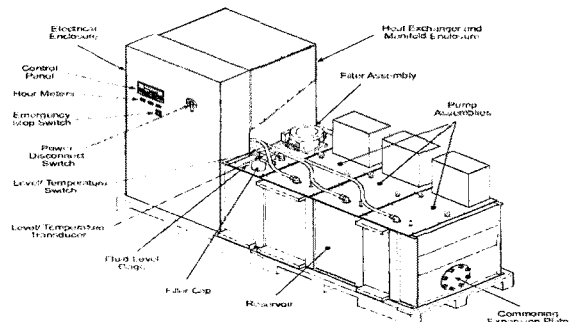


그림 9 Hydraulic Power Unit(HPU)

2.2 6축 진동내구시험 과정

그림 10에는 6자유도 가진 테이블을 이용하여 재현시험을 실시하는 과정을 나타낸 것이다. 시험 대상물을 가진 테이블 위에 설치한 다음 백색 잡음신호(white noise)를 주어 시스템의 전달함수(FRF)를 구한 후 역함수를 곱하여 구동 파일(drive file)을 생성한다. 그러나 시험 대상물은 선형시스템이 아니고 입출력 신호의 잡음 요소들에 의해 정확한 모델이 구해지지 않기 때문에 반복시험(iteration)을 수행하여 기준 이하의 RMS 오차를 가지는 구동파일을 구해야 한다. 이와 같은 과정을 거치면 실차시험과 비교하여 오차 범위 내에서 재현할 수 있기 때문에 6자유도 가진 테이블을 이용한 가진 환경은 실제의 주행 환경을 거의 유사하게 재현할 수 있다.³⁾

각 과정에 대한 내용은 다음과 같다.

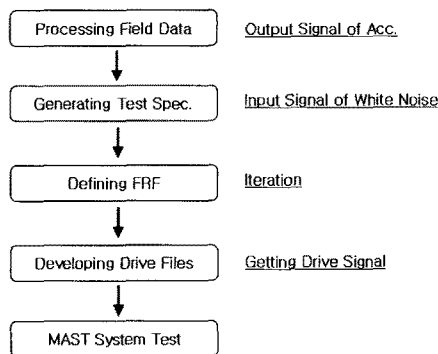


그림 10 MAST 시험 절차

2.2.1 도로 하중 계측(RLDA)

차량시스템이나 부품에 대한 시뮬레이션 시험을 위해서 가장 먼저 수행하는 것은 차량이나 부품이 도로를 주행할 때 받게 되는 하중을 측정하는 것이다. 이를 위해서는 대상품의 움직임을 가장 잘 나타내는 위치에 가속도계, 스트레인 게이지 등을 이용하여 응답을 측정 기록한다.

2.2.2 신호처리

RLDA 단계에서 기록된 데이터들은 분석을 위해 컴퓨터로 A/D 변환 및 필터링되어 저장된다. 이 신호들을 분석하여 시험 대상품에 손상을 가하는 신호와 그렇지 않은 신호로 분류하고 시험품에 손상을 주지 않는 신호는 제거한다. 이렇게 목표 신호가 결정되며 목표 파형 $Y(f)$ 를 생성한다.

2.2.3 전달함수 측정

내구시험기의 목적은 도로에서 측정된 하중 이력

을 시험실에서 정확히 재현되도록 입력 $X(f)$ 를 결정하는 것이며 이 과정에서 주파수 분석 방법을 사용한다. 시스템의 전달함수는 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Y(f) = H(f) \times X(f) \quad (1)$$

여기에서 $Y(f)$ 는 응답함수, $X(f)$ 는 입력함수, $H(f)$ 는 전체 시험 시스템의 특성을 나타내는 전달함수이다.

내구시험기 입력함수 $X(f)$ 를 구하기 위해서는 테스트 시스템의 전달함수 $H(f)$ 를 알아야 한다. 이를 위해 시험대상품을 실차 상황에 맞게 장착한 후 임의의 백색잡음(white noise)을 가한 후 대상시험품에 장착된 트랜스듀서로부터의 응답을 구하면 이 두 값으로부터 시스템 전달함수 $H(f)$ 를 구할 수 있다.

2.2.4 1차 구동 파일 생성

3단계에서 전달함수 $H(f)$ 를 구하면 식(2)를 이용하여 목표파형 $Y(f)$ 를 얻기 위한 입력신호 $X(f)$ 를 구할 수 있다.

$$X(f) = aH^{-1}(f) Y(f) \quad (2)$$

여기에서, $X(f)$: 1st drive signal

a : Iteration gain constant

를 의미한다.

2.2.5 반복 수행(Iteration)

전달함수 $H(f)$ 는 입력에 대해 선형적인 특성을 가지고 있다. 그러나 차량 시스템은 비선형적 특성을 가지고 있기 때문에 정확한 가진신호를 구하기 위해서는 신호의 반복적인 수정이 필요하다. 이 과정을 반복 수행 과정이라고 하며 목표신호 $Y(f)$ 와 응답신호 사이의 오차가 일정 수준 이하로 감소할 때까지 계속 반복하여 최종 가진신호 $X(f)$ 를 구한다.

2.2.6 6 자유도 진동 내구시험

상기 단계에서 작성된 최종 가진 신호는 전체 목표 내구 하중의 일부분이므로 테스트 스케줄에 따라 반복 시험을 수행하려면 테스트 프로그램을 작성해야 한다. 또한 시험 중 발생할 수 있는 부품의 손상 등을 모니터링 하는 것도 중요하다. 이와 같은 일련의 작업을 마친 후 내구시험 계획에 따라 시험을 실시한 후 시험대상품의 내구성을 평가한다.

3. 6자유도 가진 테이블 시험사례

3.1 굴삭기 캐빈(cabin) 내구시험

그림 11과 같이 굴삭기 캐빈을 테이블 위에 설치한 후 굴삭기의 작업조건에 따라 시험 모드를 정하고 토사 굴삭, 평탄화 작업, 암석 굴삭, 주행 조건 등에서 하중이력을 측정하고 각 시험 모드별로 각각 반복시험을 수행하여 구동 파일을 생성한다. 생성된 구동파일을 이용하여 굴삭기 캐빈의 재현시험을 수행하였으며 진동시험 중 캐빈의 각 부에 스트레인게이지와 가속도계를 설치하고 PSD의 변화와 스트레인 변화를 측정하였다. 시험 완료 후 그림 12에서 보는 바와 같이 캐빈 전면 하단 부위에서 균열이 발생하였다.

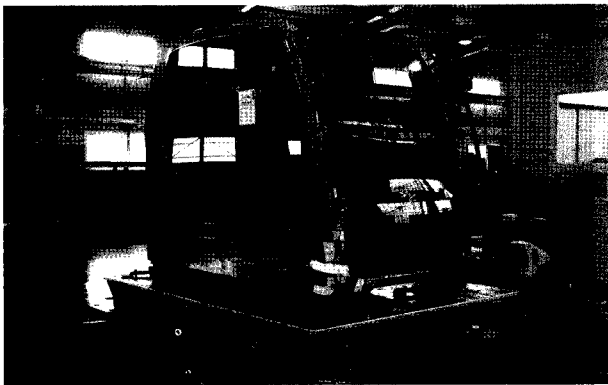


그림 11 굴삭기 캐빈 시험



그림 12 캐빈 크랙(crack) 발생

3.2 운전석 모듈(Cockpit module) 내구시험

승용차 운전석 모듈의 6자유도 진동시험을 수행하였다. 재현 내구시험을 수행하기 위하여 주행시험장에서 하중이력을 측정하였으며 측정된 하중데이터를 이용하여 그림 13에서 보는 바와 같이 운전석 모듈을 테이블 위에 설치한 후 재현 시험을 실시하였다. 목표내구시간은 90시간이며 재현내구시험 결과 운전

석 모듈의 균열이나 파손이 발생하지 않아야 한다. 90시간의 진동내구시험을 수행한 결과 운전석 모듈의 각부에 균열이나 파손이 없었으며 이상소음 및 고정구(fixture)의 풀림도 발생하지 않았다.

3.3 라디에이터 내구시험

굴삭기에 사용되는 라디에이터의 내구 신뢰성을 평가하기 위하여 여러 굴삭조건을 시험 모드로 선정하여 하중이력을 측정하고 측정된 하중 데이터를 이용하여 라디에이터의 재현 내구시험을 수행하였다. 목표내구시간은 70시간이며 내구시험 수행중 라디에이터의 각부의 균열이나 파손이 발생하지 않아야 한다. 특히 마운팅부쉬(mounting bush)의 파손이 발생하지 않아야 하며, 시험 결과 시험 종료 시까지 각부의 균열이나 파손이 없었으며 마운팅부쉬의 파손도 발견되지 않았다.

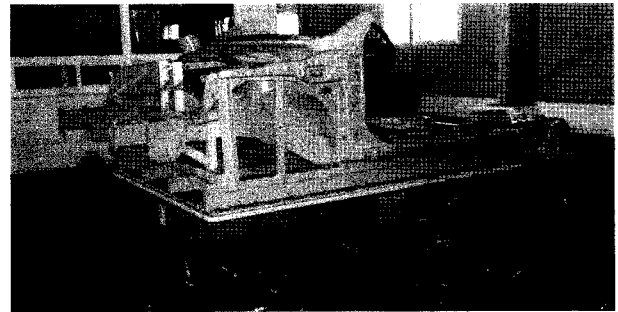


그림 13 운전석 모듈 시험

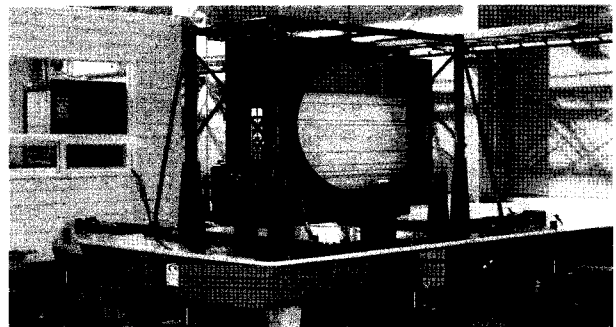


그림 14 라디에이터 시험

3.4 상용차 캐빈 승차감 시험

그림 15는 상용차 캐빈을 6자유도 가진 테이블 위에 장착한 사진으로 그림 16에 나타난 바와 같은 차체 프레임 지그를 만든 후 그 위에 캐빈 공기 현가시스템과 캐빈을 설치하여 실제 차량에 장착된 것과 동일한 환경을 구축하였다. 캐빈 장착 후 테이블 가진 신호 생성을 위해 그림 10의 절차에 따라 반복시험을 실시하였다. 그림 17에는 반복시험 진행에 따라

승차감모드에서의 RMS 오차 변화를 나타낸 것이다. 여기에서 RMS 오차는 실차 주행시험 시 상용차 차체 프레임 위에서 측정된 신호와 6자유도 가진 테이블 시험 시 발생하는 신호사이의 RMS 오차를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 반복 횟수가 증가함에 따라 RMS 오차가 감소하고 있으며 어느 정도 이상 반복시험이 수행되면 더 이상 오차가 감소하지 않음을 알 수 있다. 승차감시험로의 경우 5% 이내의 RMS 오차를 보여 생성한 구동 파일을 이용하여 재현시험이 가능할 것으로 판단되었으며 동일 가진 조건하에서 승차감 비교 시험을 수행하였다.

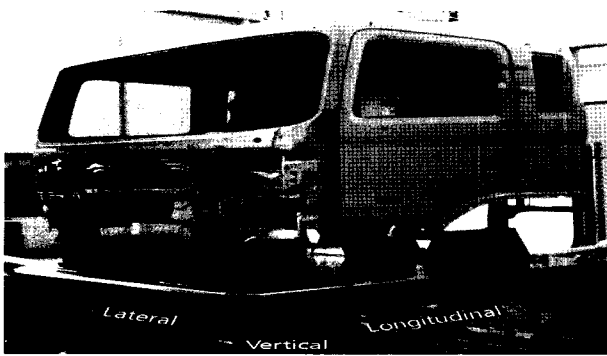


그림 15 상용차 캐빈 시험



(a) Front (b) Rear
그림 16 테이블 고정 지그

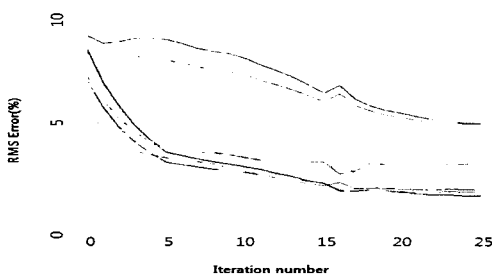


그림 17 RMS 오차 변화

4. 요약

자동차 부품은 주행 중 전후, 좌우, 상하방향의 병진 운동과 각 축에 대한 회전 운동 등 6자유도의 운동을 받는다. 이와 같은 운동에 따라 자동차에 탑재

되는 운전석(cockpit), 의자(seat), 연료탱크, 라디에이터, FEM(front end module) 등의 부품 및 모듈 등은 6자유도 운동을 받으면서 각 부품의 기능을 수행하고 있다. 따라서 이들 부품을 짧은 시간 내에 개발하기 위해서는 가속내구시험평가가 필수적인데 이를 위해 유압식 6자유도 가진 테이블을 이용한 기술이 활용되고 있다.

본 해설에서는 자동차 부품 및 모듈의 내구성능 평가 과정과 함께 유압식 6자유도 가진 테이블을 보유하고 관련 부품의 진동내구성능을 평가하고 있는 군산대학교 자동차부품기술혁신센터(KATIC)의 시험평가장비 및 사례를 기술하였다.

이와 같은 자동차 부품 내구성능평가 방법과 6자유도 가진 테이블을 이용한 시험은 향후 자동차부품 및 일반기계부품 개발업체에서 내구성능향상을 위하여 활용도가 더욱 증대될 것이다.

참고문헌

- 1) J.D. Power Report, 2007.
- 2) 군산대학교 자동차부품기술혁신센터, www.katic.or.kr
- 3) MTS corporation, 2008.
- 4) D. W. Thomas, "Vehicle Modeling and Service Loads Analysis", SAE Paper, 871940, 1987.
- 5) S. J. Choi, J. W. Park, K. G. Jeon, G. J. Choi and Y. M. Yoo, "A Study on Durability Performance Estimation for Development of Chassis Corner Module", Transactions of KSAE, Vol. 14, No. 1, pp. 159~166, 2006.
- 6) 성대운, 정기섭, 정승균, "다축-진동시험기를 이용한 자동차 엔진룸 진동내구 시험 연구", 한국자동차공회 춘계학술대회, 2004.

[저자 소개]

최규재(책임저자)

E-mail: gjchoi@kunsan.ac.kr

Tel: 063-469-4865

1963년 11월 3일생

2000년 한국과학기술원 기계공학과 박사 과정 졸업, 1987년 삼성전자 생산기술연구소 주임연구원, 1991년 자동차부품연구원 차체샤시연구센터 센터장, 2005년 군산대학교 기계공학부 교수, 군산대학교 자동차부품기술혁신센터소장

