

공기 현가장치를 장착한 화물차량의 진동측정 및 한국형 공기 현가장치 모듈 개발

Vibration Test of Truck with Air Suspension & Development of Korean Type Air Suspension

우 준 성[†] · 전 용 호^{*} · 정 성 필^{*} · 박 태 원^{**} · 권 순 기^{***}

Jun Seong Woo, Yong Ho Jeon, Sung Pil Jung, Tae Won Park and Soon Ki Kwon

(2006년 7월 4일 접수 ; 2006년 11월 29일 심사완료)

Key Words : Air Suspension(공기 현가장치), Vibration Test(진동), Development of Vehicle Chassis(샤시개발), Dynamic Model of Vehicle(차량 동역학 모델), Truck(화물차량)

ABSTRACT

A leaf spring suspension has been widely used since it can carry big load and its simplicity. But one major drawback is the poor ride performance because of the friction in the system and the high stiffness coefficient. To overcome these, an air spring suspension can be used. The air spring suspension system can improve the ride of the heavy vehicle significantly and also it can adjust the height to the loading and unloading. The road tests for the truck with the leaf spring suspension and air spring suspension are performed to compare the ride quality of the two systems. To develop the air spring suspension system tailored to the target truck, chassis development procedure using CAE has been applied.

1. 서 론

구조의 단순함과 큰 하중을 지지할 수 있는 장점으로 상용차량의 경우 겹판 스프링(multi leaf spring)을 사용한 현가장치가 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 겹판 스프링은 판과 판 사이의 마찰력 및 높은 스프링 상수로 인한 승차감 저하의 단점을 가지고 있다.

이런 단점을 보완하기 위한 공기 스프링 현가장치(air spring suspension)는 낮은 스프링 상수를 가지고 있어 승차감 향상에 유리하며, 차량 내부의 진

동 절연으로 부품간의 기계적 마모를 감소시켜 부품 수명향상의 장점을 가지고 있다. 또한 스프링 내부의 공기압을 조절함으로써 차고를 일정하게 유지시키거나, 원하는 높이로 조절 가능하다.

현재 공기 스프링의 대부분은 미국, 일본, 유럽 등에서 출시되고 있으며, 국내는 이를 수입하여 겹판 스프링이 장착된 차량에 교체·장착하는 업체가 대부분이다.

이 연구는 각각 겹판 스프링과 공기 스프링을 장착한 상용차량의 진동측정 결과를 비교분석 하였으며, 겹판 스프링을 장착하여 출고된 국내 상용차량의 현가장치를 공기 스프링 현가장치로 쉽게 교체할 수 있는 “한국형 화물차량 공기현가장치” 모듈을 고안하였다.

[†] 책임저자; 정회원, 아주대학교 대학원 기계과

E-mail : jaywoo7@ajou.ac.kr

Tel : (031)219-2952, Fax : (031)219-1965

^{*} 아주대학교 대학원 기계과

^{**} 정회원 아주대학교 대학원 기계과

^{***} 정회원, (주) 골드벤

2. 진동측정

2.1 진동측정 차량 제원

진동 시험 대상 차량은 5톤 트럭으로 주요 제원은

아래의 Table 1과 같다. 공기 스프링 현가장치를 장착한 차량과 겹판 스프링 현가장치를 장착한 차량은 같은 제조사에서 생산된 동일 모델이며, 공기 현가장치 차량은 출고 시 장착된 겹판 스프링을 제거한 후 수입된 공기 현가장치로 교체 장착한 차량이다.

2.2 시험장치의 구성

(1) 시험장비

가. 가속도계 : 0.5 Hz ~ 1000 Hz의 측정 주파수 범위를 갖는 3축 가속도계 2개와 단축 가속도계 1개를 사용하였다.

나. SCXI system : Data 수집 장치로서 가속도계로부터 들어오는 신호를 notebook으로 보내는 인터페이스 역할.

다. Software : 디지털 신호를 그래픽으로 가시화시키는 역할과 데이터 저장 (LabView)

라. BNC cable : 가속도계와 SCXI 장비를 연결.

마. 인버터 : 차량 주행 중 SCXI system과 notebook에 전원 공급

(2) 가속도계 장착

가속도계는 차량의 적재함 전(1st spot), 후(2nd spot)

Table 1 Specification of truck

Weight (kgf)		6665
Max capacity weight (kgf)		5000
Dimension (mm)	Length	8620
	Width	2400
	Hight	2525
Full weight distribution	Front (kgf)	2740
	Rear (kgf)	2325
Empty weight distribution	Front (kgf)	3705
	Rear (kgf)	6555

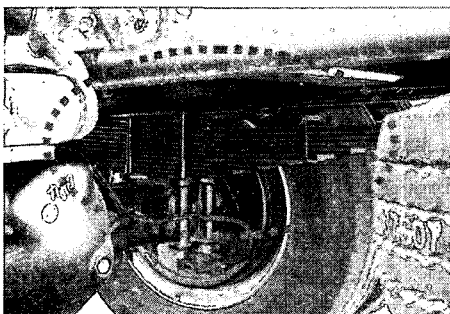


Fig. 1 Leaf spring suspension

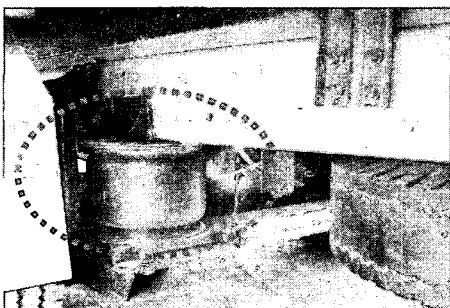


Fig. 2 Air spring suspension

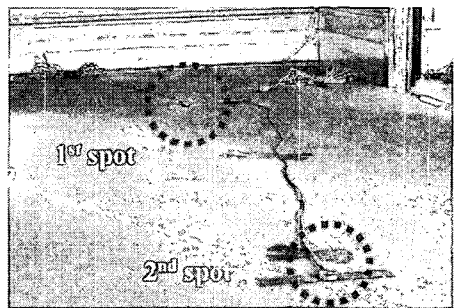


Fig. 3 Accelermeter attachment on the cargo base

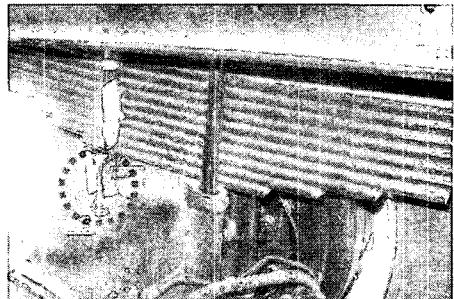


Fig. 4 Accelermeter attachment on axle-Leaf spring suspension



Fig. 5 Accelermeter attachment on axle-Air spring suspension

와 후륜 차축위에 장착되었으며, 고편 스프링 차량과 공기스프링 차량의 동일한 위치에 장착하였다.

(3) 실험장치의 흐름도

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 차량에 장착된 가속도계마다 측정장치인 SCXI system과 연결되어있으며, 실험에서 조건에 따라 측정된 데이터들은 notebook에 각각 저장되고 계속되는 실험마다 같은 형태로 측정값을 얻을 수 있다.

2.3 시험방법

(1) 시험조건

시험은 국내 지방도로와 고속도로에서 이루어졌으며 주요 시험구간과 주행속도, 측정시간은 Table 2와 같다. 각 조건마다 2회의 시험을 실시하였다.

(2) 측정 데이터 처리

구성한 측정장비를 통하여 얻은 데이터는 시간에 대한 가속도 성분이다. 이 연구에서는 각 주행 조건에서 센서로부터 입력된 가속도를 RMS 값으로 계산하여 진동영향을 분석하였다. 아래의 식과 같이 RMS 값은 시간에 대한 변화량을 고려하고, 진동이 파괴적 능력을 나타내는 에너지량과 직접 관련된 진폭을 표시하므로 진동 크기의 표현에 가장 적절한 것으로 알려져 있다.

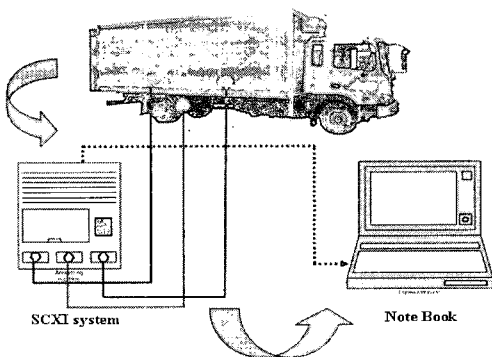
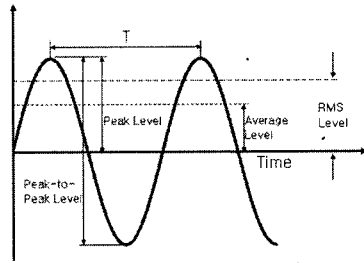


Fig. 6 Acquisition of data

Table 2 Driving condition

Driving condition	Velocity (km/h)	Run time (sec)
Speed bump	20	60
Unpaved road	20	60
Highway	10	420



$$RMS \text{ Level} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

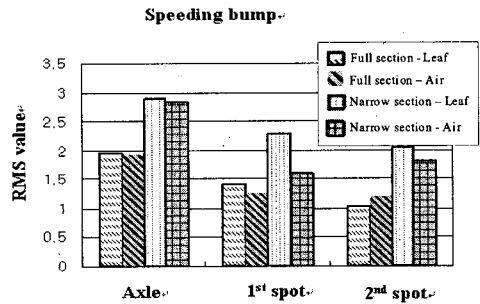
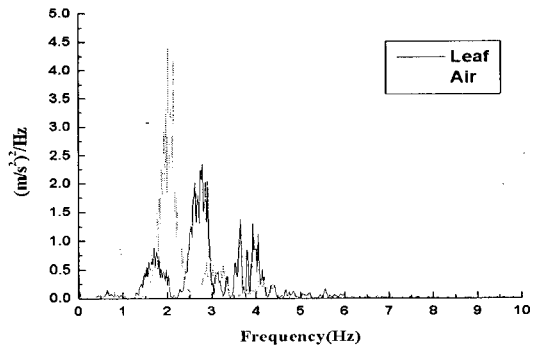
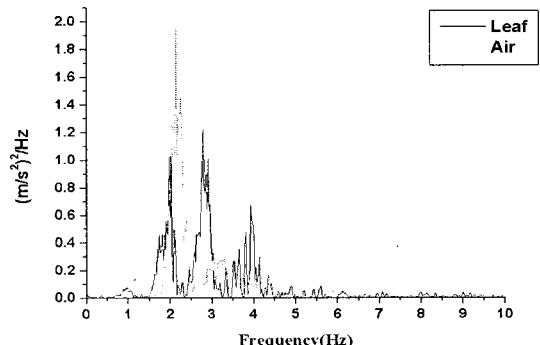


Fig. 7 RMS of speed bump condition



(a) Acceleration on the 1st spot



(b) Acceleration on the 2nd spot

Fig. 8 PSD over a speed bump

또한, 시간에 대한 가속도 데이터를 주파수 분석하여 저주파 밴드필터(low pass band filter)에 통과 시킴으로써 샘플링 동안 발생할 수 있는 신호왜곡에 따른 오차를 제거하였다. 디지털 신호로 변환된 신호에 대하여 급속 푸리에 변환(FFT)을 사용하여 주파수 영역으로 변환시킨 후 각 주파수에 대한 진동가속도 파워밀도(PSD)를 구하였다. 이 연구의 관심 주파수 영역은 1~20 Hz이며 신뢰성 있는 측정

을 위하여 500 Hz로 샘플링 하였다.

2.4 시험결과

(1) 과속방지턱 통과

3개의 과속방지턱을 연달아 통과하는 시험(full section)과 1개의 과속방지턱을 통과하는 시험(narrow section)을 수행하였다. Fig. 8은 full section에서의 PSD를 비교하였다.

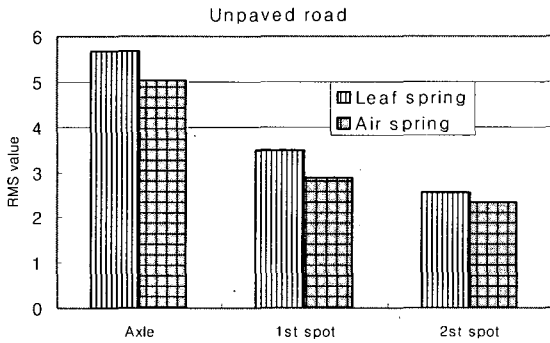


Fig. 9 RMS of unpaved road condition

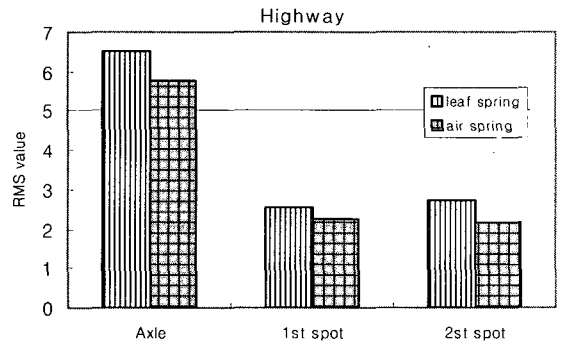
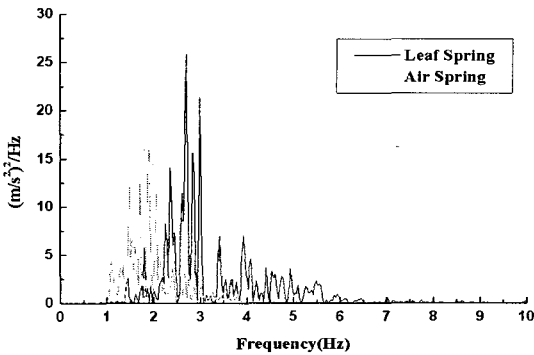
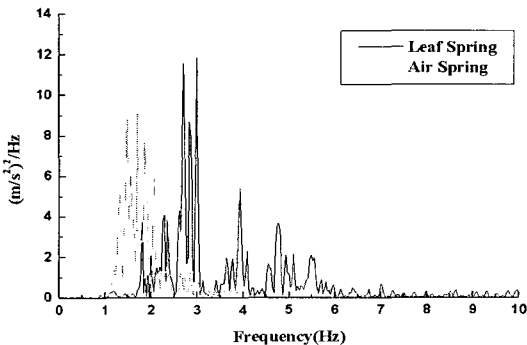


Fig. 11 RMS of highway condition

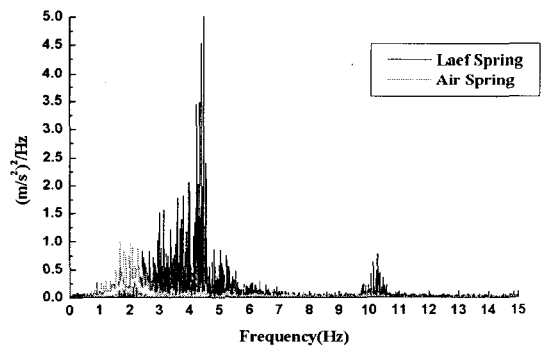


(a) Acceleration on the 1st spot

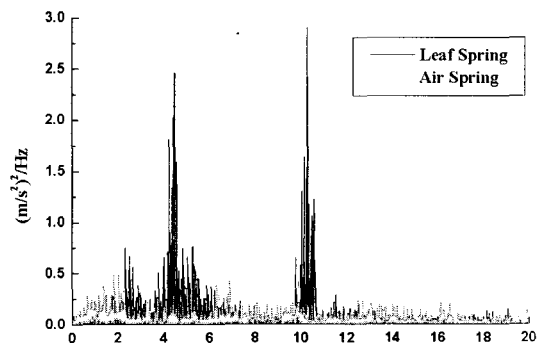


(b) Acceleration on the 2nd spot

Fig. 10 PSD of unpaved road condition



(a) Acceleration on the 1st spot



(b) Acceleration on the 2nd spot

Fig. 12 PSD of highway condition

Fig. 8의 결과에서 겹판스프링 차량에 비하여 공기스프링 차량의 PSD가 2Hz부근에서 높게 나타났다. 이는 공기스프링 장착 차량이 겹판스프링 장착 차량에 비하여 저주파에서 민감하게 반응함을 나타내며, 공기스프링의 경우 낮은 고유진동수를 가진 유체 등을 이송하는 차량에는 적합하지 않음을 알 수 있다.

(2) 비포장도로로 주행

비포장도로에서의 RMS 값은 겹판스프링 장착 차량에 비하여 공기스프링 차량이 10~20% 가량 줄어들음을 확인할 수 있었다. 주파수응답 역시 겹판스프링 차량에서 볼 수 있는 4~5Hz 성분이 거의 사라진 것을 볼 때 차량의 승차감이 상당부분 향상된 것을 확인할 수 있었다.

(3) 고속도로로 주행 시

고속도로로 주행의 경우 RMS 분석을 통하여 공기스프링 차량이 20% 감소한 것을 볼 수 있다. 특히 겹판스프링 차량에서 나타난 4.5Hz 부근과 12Hz 부근의 진동영향이 공기스프링 차량의 경우 모두 감소함을 보여 고주파 입력에 대한 절연효과가 우수함을 확인할 수 있었다.

3. 한국형 공기 현가장치 모듈개발

3.1 모듈 개발 배경

공기현가장치는 앞의 시험 결과로 볼 수 있듯이 높은 주파수의 진동을 효율적으로 절연할 수 있으며, 화물 및 차량의 손상을 크게 줄일 수 있다. 이러한 장점으로 근래는 고가품이나 희귀물의 수송뿐만 아니라 일반적인 화물 운송차량에도 많이 쓰이고 있어 그 수요가 점차 증가되고 있다.

그러나 아직 국내 많은 공기현가장치 장착차량은 출고 시 장착된 겹판 스프링을 수작업으로 제거한 후 수입된 공기 현가장치 모듈을 장착하고 있는 실정이다. 이 공정에서 수입 모듈이 국내 차량 제원에 맞지 않아 프레임의 탈·부착 시 기존 프레임을 깎아내거나, 브레이크 드럼 및 에어 챔버의 위치를 바꾸는 등 불필요한 시간과 노동력을 소모하고 있다.

이 연구에서는 공기 스프링 현가장치의 진동측정 뿐만 아니라 샤시(chassis)개발 기법을 통하여 국내

화물차량의 제원에 맞으며, 빠르고 쉽게 겹판 스프링 현가장치를 공기 스프링 현가장치로 교체·장착할 수 있는 모듈을 고안, 개발하고자 하였다.

3.2 차량의 샤시 개발기법

개발하고자 하는 현가장치 모듈이 장착된 화물차량을 컴퓨터를 이용하여 다물체 동역학 모델링 하였으며, 이 모델을 통하여 현가장치의 컴플라이언스와 부시 및 조인트에 가해지는 하중, 그리고 승차감을 예측할 수 있다.

또한, 현가장치를 유한요소로 모델링(FEM)하여 타이어 밀면에서 하중을 가한 후 프레임에 나타나는 응력을 분석하고 안전성을 평가한다.

개발될 한국형 공기 현가장치 모듈의 비교대상으로서 수입 모듈을 동역학 모델링 및 유한요소모델링 하였다.

Fig. 13은 샤시 개발의 흐름도를 나타낸다.

3.3 동역학 모델링

(1) 차량 제원

개발중인 모든 공기 현가장치의 스프링은 수입모

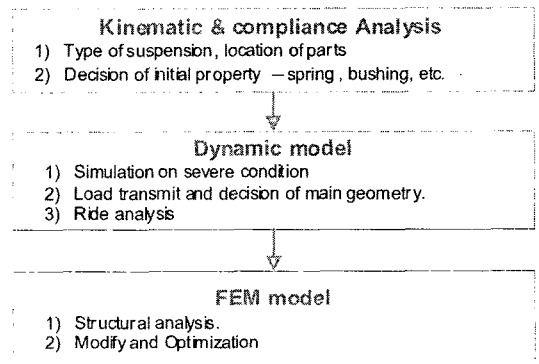


Fig. 13 Development of chassis

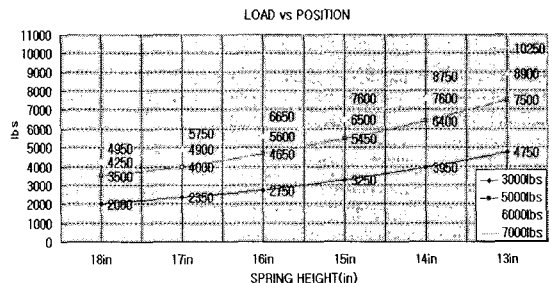


Fig. 14 Air spring property

들과 동일한 제품을 사용하였으며 동특성 곡선은 제조사로부터 입수할 수 있었다. 공기 현가장치는 레벨링밸브(leveling valve)로 스프링 내부압력을 일정하게 유지함으로써 정차 시 적재중량에 관계없이 항상 일정한 높이를 유지한다. 스프링의 초기 하중과 장착 높이가 결정되면 다음의 동특성 곡선에서 스프링특성을 유추할 수 있다.

Fig. 14에서 공기스프링은 적재하중에 대한 스프링강성(곡선의 기울기)이 거의 유사함을 보인다.

프레임간의 연결위치는 부시를 사용하였으며, 강성은 공기 스프링을 장착한 공차 시 중량 11 ton 버스의 부시 데이터를 이용하였다.

타이어는 MSC.ADAMS 프로그램의 UA tire모형을 사용하였으며 제조사로부터 강성을 입수할 수 있었다.

(2) 과속방지턱 통과

차량의 동역학 모델은 상용프로그램인 ADAMS를 사용하였으며 Fig. 15에서 Fig. 17은 수입모듈과 개발 중인 한국형 모듈을 장착한 차량 동역학 모델을 나타낸다. 대상 차량은 11 ton(4×6) 화물차량(최대 총 중량 22.5 ton)이며, 모듈을 이루는 공기스프링, 댐퍼, 부싱 등의 부품은 모두 동일한 제원을 이용하여 모델링되었다.

개발모듈(Fig. 16, Fig. 17)은 수입모듈(Fig. 15)에 비하여 쉽고 안전하게 에어스프링으로 장착할 수 있도록 고안되었다.

현가장치의 프레임을 제외한 동일한 부품을 사용한 3개 모듈의 동역학 시뮬레이션을 통하여 부품의 위치에 따른 승차감 차이를 확인해 볼 수 있다.

개발된 동역학 모듈의 승차감을 평가하기 위하여 과속방지턱 통과 시험을 하였다. 과속 방지턱은 한국의 도로교통법 규정에 따라 폭 1m, 높이 0.1m로 결정하였으며, 차량이 최대적재상태 (22.5 ton)임을 감안하여 진입속도는 10 km/h로 하였다.

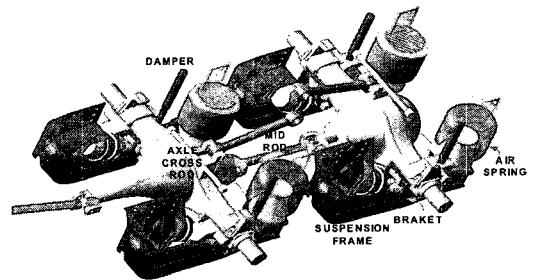


Fig. 15 Imported air suspension module

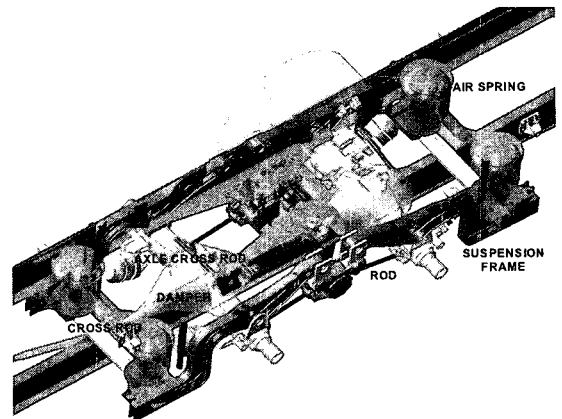


Fig. 16 Invented air suspension module_A

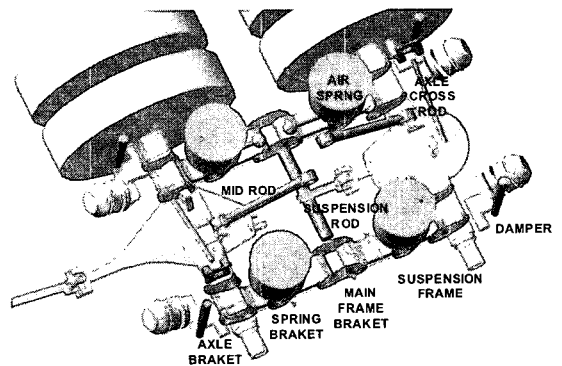


Fig. 17 Invented air suspension module_B

Table 3 Property of bushing

	X	Y	Z	
Axial stiffness	19235.29	20872.34	19235.29	N/m
Rotational stiffness	5E+6	2E+6	5E+6	N mm/deg
Axial damping	100	100	100	N s/mm
Rotational damping	4000	200	4000	N mm s/deg

Table 4 Tire property

VSR	108 (kgf/mm)
LSR	39 (kgf/mm)
RSR	60 (kgf/mm)
TSR	30 (kgf/deg)

Fig. 18에서 Fig. 20까지 수입모듈 장착차량과 개발모듈 A와 B를 장착한 차량이 과속방지턱을 통과할 때 적재함의 수직 상·하 가속도를 나타낸다.

개발모듈의 승차감을 평가할 수 있는 방법 중의 하나인 과속방지턱 통과 모델은 적재함의 상·하 가속도와 통과 후 차량이 안정화 되는 시간으로 검토된다.

모듈 A와 B는 화물차량이 출고될 때의 차축 위치와 브레이크 드럼의 위치를 변경할 수 없기 때문에

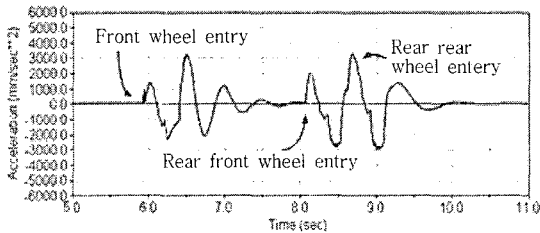


Fig. 18 Vertical acceleration of truck Imported module

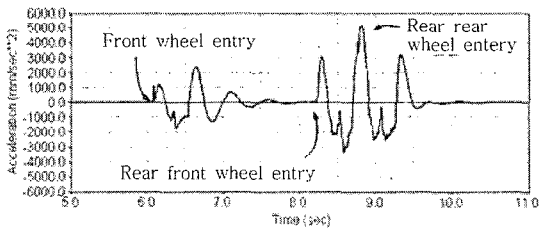


Fig. 19 Vertical acceleration of truck Invented module_A

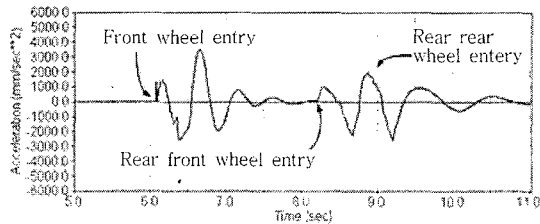


Fig. 20 Vertical acceleration of truck Invented module_B

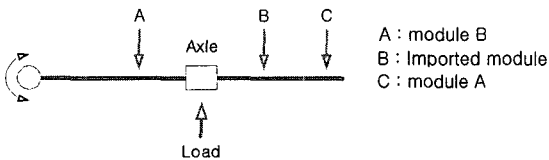


Fig. 21 The position of air spring

공기 스프링을 후륜의 두 차축 안쪽과 바깥쪽에 장착하였다.

과속방지턱을 지나면서 지면에서 타이어를 통하여 차축에 전달된 하중은 현가 프레임에 장착된 공기스프링과 피봇을 통하여 차체로 전달된다. 동일한 공기스프링을 사용한 공기현가장치라도 스프링과 댐퍼의 위치에 따라 Fig. 18에서 Fig. 20과 같이 승차감 특성은 달라지게 된다. 차축과 공기스프링의 거리가

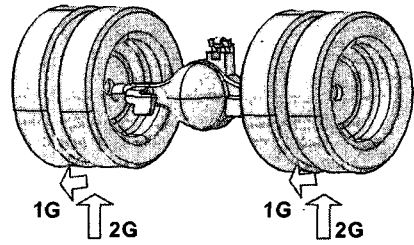


Fig. 22 Load condition

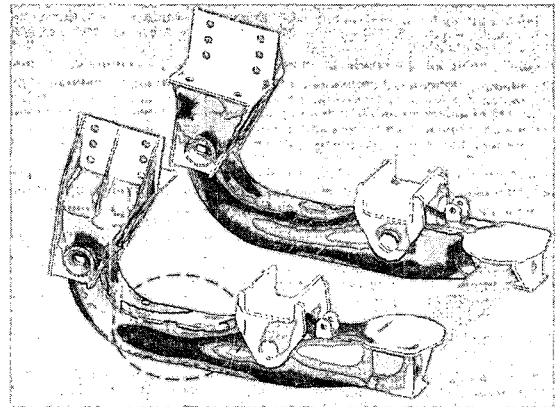


Fig. 23 Fatigue analysis of imported module

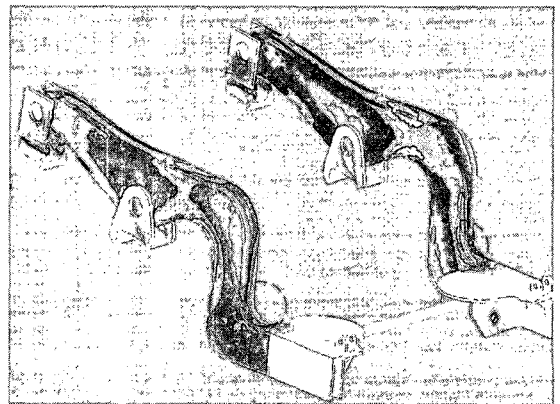


Fig. 24 Fatigue analysis of invented module_A

먼 모듈 A의 경우 공기스프링의 반응이 차축에 민감하게 전달되어 적재함의 상방향 가속도가 크게 나타나는 경향이 있으며, 반면 모듈 B의 경우 차량이 과속방지턱을 통과한 후에도 차량의 진동은 계속된다.

3.4 현가장치의 정적응력해석

현가장치는 차량의 지면으로부터 전달되는 진동과 충격을 절연하는 만큼 구조적인 안전성 역시 고려되어야 한다. 때문에 사시설계 시 유한요소모델을 통한 단품의 강도 평가와 치수 및 설계수정 과정이 필요하다. 프레임의 재질은 구조용강(SS400)을 선택하였다.

정적인 유한요소해석을 위하여 타이어의 밑면에서 모듈에 가하는 하중은 방향에 따라 축하중의 1~2배를 가하였으며(Fig. 22), 주행 중 발생 가능한 상황을 구현하여 응력이 집중되는 부분을 검토 한다.

Fig. 23과 Fig. 24는 여러 상황 중 차량이 급정지하며 웅덩이에 빠지는 경우 현가장치에 발생하는 응력을 나타낸다. 이때 차량 진행이 반대방향으로 차축하중의 1배(3.6 ton), 수직 상 방향으로 2배(7.2 ton)의 하중을 가한다.

시험결과 수입 모듈은 최대응력 227 MPa, 모듈 A는 236 MPa로서 SS400의 허용응력인 400 MPa보다 작게 분포하여 구조적으로 안전하다고 평가할 수 있다.

4. 결 론

4.1 공기 스프링을 장착한 차량의 진동측정

이 진동측정 시험은 일반적인 겹판 스프링 장착차량에 대한 공기 스프링 장착차량의 적재함에서 진동 영향을 측정, 검토하는 것이 주된 목적이다. 진동측정은 각각의 주행조건을 나누어 수행되었으며 이상의 시험으로 공기 스프링 장착 차량의 특성을 다음과 같이 파악할 수 있었다.

첫째, 적재함 내부의 진동은 일반적인 도로조건에서 겹판 스프링 장착차량보다 공기 스프링 장착차량이 현격히 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 예를 들어 고속도로 주행의 경우 겹판 스프링 차량은 4.5Hz 부근에서 진동영향이 가장 크게 측정되었고, 공기 스프링 차량의 경우 2Hz 부근에서 가장 크게 측정되었다. 이 결과로 겹판 스프링 차량이 공기스프링 차

량의 2배 이상 자주 진동하였음을 알 수 있다.

둘째, 과속방지턱 통과를 제외하고 공기 스프링 장착차량의 RMS와 PSD값이 낮아짐을 확인할 수 있었다. 이는 적재함에서 주파수 파워, 즉 에너지가 낮음을 의미하기 때문에 시스템이 충분히 유연하다는 결과를 보여준다.

셋째, 과속방지턱 통과조건은 시스템의 저주파 가진에 대한 응답을 시험한 것으로 볼 수 있다. 측정 결과 공기스프링 장착차량은 주파수 특성이 낮아진 반면 PSD는 높게 나타났다. 즉 공기 스프링은 저주파 대역의 진동에 대하여 겹판 스프링 보다 크게 반응함을 알 수 있으며, 저주파 고유진동을 갖는 화물을 운반할 경우 위험할 수 있다.

4.2 한국형 공기 현가장치 모듈개발

기구 동역학 모델 및 유한요소 모델을 통한 한국형 공기 현가장치 모듈개발의 목적은 안전하고 빠른 모듈의 교체작업과 수입모듈에 견줄 수 있는 승차감, 그리고 신뢰성 있는 프레임을 제공함에 있다.

과속방지턱 통과 시 수직 상·하 방향의 가속도크기는 모듈 B가 유리하나, 통과 후 차량의 진동이 안정화 되는 시간은 모듈 A가 유리하다. 비록 진동의 크기가 작더라도 계속하여 잔여 진동이 있다면 운전자는 불편함을 느끼게 된다.

또한, 모듈 B는 휠강성이 낮은 반면 차축이 스프링의 뒤에 위치하므로 공기 스프링의 초기 압력이 매우 높다. 차량의 컴프레서에서 이 하중을 견딜 수 있는 압력을 유지하지 못할 경우 현가 프레임에 충격이 가해질 수 있거나 스프링의 파손을 초래할 위험이 있다.

반면 모듈 A의 경우 현가 프레임의 길이가 긴 단점이 있으나 그 구조가 간단하고, 쉽게 장착할 수 있는 장점이 있다.

마지막으로 유한요소해석을 통하여 구조적으로 안전한 현가장치를 위한 설계와 프레임의 치수 및 불필요한 요소를 줄일 수 있었다.

이 논문에서는 주행 중 차량의 수직방향 가속도만을 언급하였다. 그러나 구성된 시스템의 휠 강성은 조정안전성 및 선회 시 횡방향 가속도에도 영향을 미치게 된다. 이에 따라 앞으로도 선회 및 조향 모델링에 의한 예측과 실제 현가장치 제작 및 측정시험을 통한 안전성이 검토되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Hongwei Liu, Dejun Zhaung, 2002, "A Study on Nonlinear Stiffness Characteristic of Air Spring for Bus" , SAE 22002-01-3092, pp.717~722
- (2) Ibrahim, I. M. and Crolla, D. A., 1996, "Effect of Frame Flexibility on the Ride Vibration of Trucks" , Computers & Structures, Vol. 58, No. 4, pp. 709~713.
- (3) Park, T. W., Yim, H. J., Lee, G. H., Park, C. H. and Jeong, I. H., 1996, "Development of Leaf Spring Modelling Method for Dynamic Analysis of Mini-Bus" , Journal of the KSAE, Vol. 6, No. 1, pp. 460~466.
- (4) Choi, Y.-G., Cheung, W.-S., Park, S.-J. and Yoon, Y.-S., 1997, "Evaluation of the Ride Values of Passenger Cars on the Unevenness and Endurance Roads" , Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 6, pp. 1025~1030.
- (5) Tak, T. O. and Kim, K. C., 1999, "A Study On Airspring Suspension for Commercial Vehicles" , Journal of the KSAE, pp. 485~490.
- (6) Moon, I.-D., Oh, C.-Y., Kwon, H.-J. and Lee, S.-H., 2002, "Dynamic Characteristics Analysis for a Large-sized Commercial Vehicle with a Rear Axle Air Suspension" , Journal of Engineering Research, Vol. 3, pp. 223~230.
- (7) Hwang, W. G., Kim, W. Y. and Im, H. E., 1999, "Development of Optimal Design System of Vehicle Suspension" , Journal of the KSAE, Vol. 7, No. 3, pp. 339~347.
- (8) Choi, C. and Bea, K. I., 1996, "The Stress Analyses of Chassis Component in the Early Stage of Vehicle Development" , Journal of the KSME, Vol. 36, No. 9, pp. 876~885.