



<응용논문>

시스템 모델을 활용한 상용차 시트 현가장치 성능 평가

이 위 로¹⁾ · 최 형 연^{*1)} · 박 종 찬²⁾홍익대학교 기계시스템 디자인공학과¹⁾ · 현대자동차 상용해석리서치랩²⁾

Evaluation of Commercial Vehicle Seat Suspension Performance Using System Model

Whe-Ro Lee¹⁾ · Hyung Yun Choi^{*1)} · Jong-Chan Park²⁾¹⁾Department of Mechanical System Design Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Korea²⁾Commercial Vehicle CAE Research LaB, Hyundai Motor Group, 150 Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi 18280, Korea

(Received 9 May 2018 / Revised 31 July 2018 / Accepted 14 November 2018)

Abstract : Drivers of heavy-duty vehicles sit for long periods of time, and they are occasionally exposed to various types of road conditions, including paved, unpaved, and rugged roads. For this reason, it is necessary to design the seat of a heavy-duty vehicle in such a way that it will effectively protect the driver from secondary vibration at the floor level. In general, the vehicle seat's ride comfort design includes static support for sitting posture and dynamic isolation of floor level vibration. The pattern analysis of a measured sitting pressure distribution provides a design evaluation of the static support, while the body's force transfer is for the dynamic isolation of the excitation vibration. An essential evaluation of the seat design occurs mainly after the prototype becomes available in the current vehicle design process. At this stage, improving the seat ride design is a slightly difficult task, and it requires much more time and cost. This study introduces a digital pneumatic suspension model for the heavy-duty vehicle seat in order to evaluate ride comfort design at an early stage in a virtual environment.

Key words : Pneumatic suspension(공압 현가 장치), Auto leveling valve(체중감응식 자동 높이조절 밸브), Heavy-duty vehicle(대형자동차), Shock absorber(감쇠기), System analysis(시스템 분석), ISO2631(기계적 진동 및 충격 - 전신 진동에 대한 사람의 노출 평가)

Nomenclature

A	: area, m ²
k _s	: stiffness of air spring
F	: cross section force
x	: stroke
P	: air pressure
P _a	: ambient air pressure
A _e	: initial cross section area

1. 서론

상용차는 승용차와 달리 장시간, 장거리 운행을 하며 다양한 노면을 주행하기 때문에 승용차보다 운전자의 안락감이 더 중요하다. 운전자의 주행 안락감은 장시간 주

행으로 인한 피로감으로, 결국 노면에서의 진동이 시트를 통해서 운전자에게 전달되기 때문에 시트의 설계가 매우 중요하다. 시트는 차체의 진동으로부터 최종적으로 운전자를 보호해야 한다. 승용차 시트의 경우 고밀도 폼을 사용하는 등 소재개발을 중심으로 연구하는 경우가 많으며, SEAT 지수 등을 활용하여, 주행 안락감을 평가하는 연구들이 진행되고 있다.¹⁾ 상용차의 경우 진동 뿐 아니라 다양한 충격 환경에 노출 되어 있어 시트 폼만으로 대응하기 어려움이 있다. 많은 경우 상용차 시트는 별도의 독립적인 현가 장치를 시트 아래 부분에 가지고 있다. 시트 현가 장치는 상하 방향에 대하여 큰 스트로크를 가지는 링크 구조와 스프링 및 감쇠기로 구성되어 있다. 스프링은 코일 스프링 또는 에어스프링이 사용된다. 코

*Corresponding author, E-mail: hychoi@hongik.ac.kr*This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

일 스프링은 구조가 간단하고 가격이 저렴하나 운전자의 착좌 높이를 일정하게 유지하기 어렵고 공진에 취약하다. 반면 에어스프링은 유압 시스템이 연결되어야 하고 구조가 복잡하나 공기의 압력만으로 강성을 쉽게 설정할 수 있고 공진 설계가 용이하여 고사양의 시트에 많이 사용된다. 감쇠기는 시트의 상하 방향 진동의 감쇠를 위하여 사용되며 고사양 시트의 경우 감쇠기의 강도를 조절할 수 있는 가변식 감쇠기가 사용되기도 한다. 본 연구에서는 에어 스프링 및 가변식 감쇠기와 자동 높이조절 장치를 가지고 있는 상용차 시트 현가장치²⁾를 수학적 모델을 기반으로 한 시스템 모델로 구현하였다. 시스템 모델은 시스템의 주요 기능을 중심으로 시뮬레이션을 수행할 수 있어 유한요소해석모델 등에 비하여 계산 속도가 매우 빠르며 인자간 분석이 용이하여 초기 설계 단계에서 매개변수 연구 및 분석에 유리하다. 시스템으로 구성된 시뮬레이션 모델을 사용하여 가변 감쇠기의 성능에 따른 시트 현가장치의 진동 감쇠 성능을 예측하였다. 그리고 기계식 구조으로 시트의 높이를 일정하게 유지하는 자동 높이조절 장치의 원리를 분석하여 시스템 모델에 적용하였다. 그리고, 정적/동적 현가장치 평가 시험³⁾을 수행하여 시스템 모델을 검증하였다.

2. 시트 현가장치 시스템 모델 구성

2.1 시트 현가장치 프레임 모델 구성

시트 현가 장치의 일반적 구조는 상부와 하부 프레임을 대각으로 연결하여 수직 방향의 자유도를 갖도록 하는 링크 구조이다(Fig. 1). 앞쪽의 링크는 전후 방향과 회전방향의 자유도를 가지고 있으며 뒤쪽의 링크는 회전

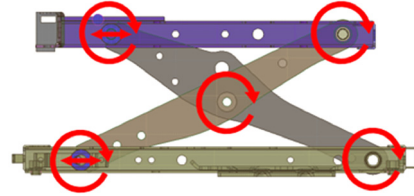


Fig. 1 Joints with free DOF in under body frame structure

방향의 자유도만 가지고 있다. 대각으로 연결된 판넬이 만나는 부분에 회전 자유도를 갖는 조인트가 추가 되어 있어 결과적으로 전체 링크는 상하 방향의 운동만 가능하다. 프레임은 현가 장치의 기본 골격으로 현가 장치의 자유도를 결정하며 에어스프링, 감쇠기는 프레임에 결합되어 현가장치의 강성을 결정한다. 프레임 링크의 위치, 길이, 중량에 따라서 전체 시스템의 최대 스트로크 및 운동 성능이 달라진다. 따라서 주요 부품의 무게와 재원을 정확히 측정하여 프레임 시스템 모델을 구성하였다. 또한 프레임 링크 구조의 경우는 닫힌 기구학적 체인(closed loop kinematic chain)으로 모델 구성 시 관절의 자유도가 중복되는 문제가 발생하기 때문에 조인트와 구속 조건을 결합하여 모델을 구성하였다. 시트 현가장치의 시스템 다이어그램은 Fig. 2에 명시 하였다. 각각의 부품은 질량과 관성을 가지고 있는 강체(CAD), 조인트, 구속 조건 요소로 연결되었다.

2.2 에어스프링 모델 구성

에어스프링 모델의 강성은 내부 공기의 압력, 볼륨, 유효 면적으로 계산될 수 있다. 스프링강성을 계산하기 위해서 단품에 대한 압축 시험을 수행하여 압력과 하중 및 볼륨을 측정하였다.

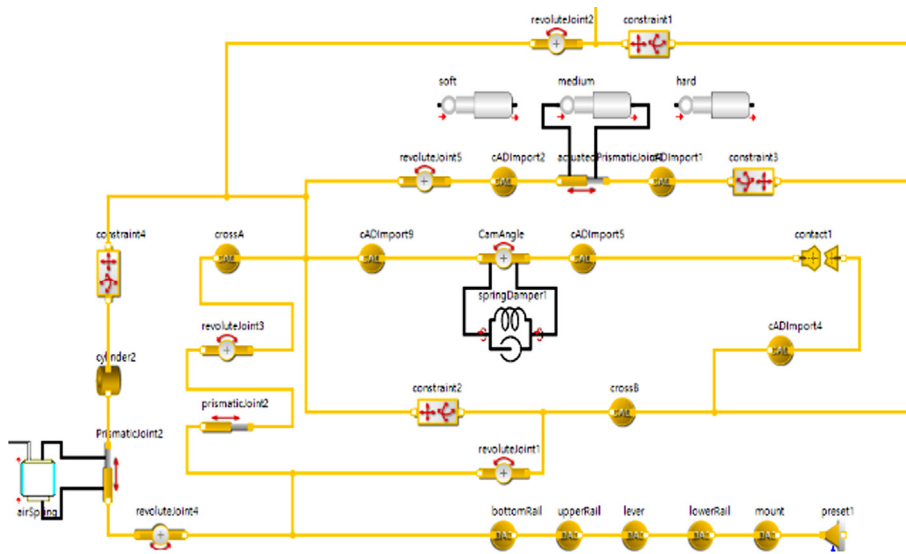


Fig. 2 Diagram of Seat frame

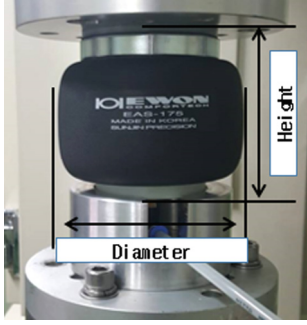


Photo. 1 Air spring test

에어스프링은 압축/팽창에 대하여 비대칭 거동을 보이며 특히 압축 시 10 mm 이후 에어스프링의 단면적 변화의 영향으로 하중이 급격히 증가하는 비선형 거동을 보인다. 이것은 에어스프링의 강성이 변위에 따른 셀 내부 공기의 온도/압력/체적에 의해서 결정되기 때문이다.²⁾ 따라서 에어스프링의 강성(k_s)은 다음과 같이 시트 위치에 따른 에어스프링의 체적과 압력에 따른 조건식으로 표현되어야 한다.

$$dF = \int \left(A_e \frac{d(P - P_a)}{dx} + (P - P_a) \frac{dA_e}{dx} \right) dx \quad (1)$$

식 (1)을 사용하여 셀 내부의 압력이 9 bar일 경우 압력 변화에 의한 강성과, 유효 단면적 변화에 따른 강성을 계산하고, 시스템 모델에 적용하여 시험결과와 비교하였다 (Fig. 3). 스프링 모델은 변위에 대하여 에어스프링의 압력/체적 데이터를 사용할 수 있는 SimulationX™의 “air spring”요소를 사용하였다. 시험 결과와 비교한 결과 계산된 에어스프링의 강성은 시험과 매우 유사한 거동을 보였다. 다만 스프링의 압축과 신장에서 발생하는 히스테리시스의 경우 에어스프링 내부의 온도변화가 추가적으로 고려되어야 한다.

2.3 공압 시스템 구성

에어스프링은 내부에 공기를 필요로 하기 때문에 공압 시스템에 의해서 제어된다. 시트의 높이를 일정하게 유지하기 위해서는 시트 높이에 반응하여 에어스프링 내부의 공기를 유기적으로 제어할 수 있어야 한다. 본 연구에서 사용된 시트 현가장치는 기계적 메커니즘으로 에어스프링을 내부의 공기를 유기적으로 제어하는 자동 높이조절 장치를 반영하였다. 즉 시트의 높이가 낮아지면 에어스프링 내부의 압력이 증가하여 공기를 배출하여 강성을 낮추고, 시트의 높이가 높아지면 부족한 공기를 충전하여 에어스프링의 강성을 증가시킨다. Fig. 4는 자동 높이조절 장치의 구조이다. CAM 구조에 의해서 에어탱크와 시트 에어스프링 사이의 밸브를 제어한다. 기구학

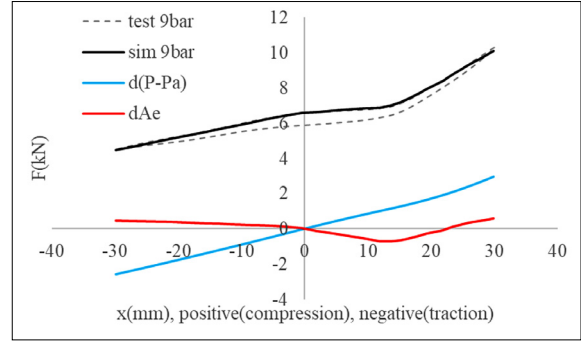


Fig. 3 Pressure and effective cross section area changes with compression

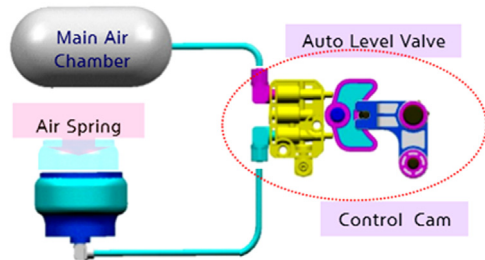


Fig. 4 Auto Leveling Valve

적 높이조정장치의 메커니즘을 시스템 모델로 표현하기 위하여 시그널 함수로 새로운 로직을 구성하였다. 로직은 CAM angle을 입력값으로 사용하고 밸브의 미세한 유격을 leveling 함수로 구현하여 에어스프링의 유량을 제어한다(Fig. 5).

2.4 감쇠기 모델 구성

감쇠기의 작동 주파수 범위는 대략 1 ~ 5 Hz이다. 이는 시트 쿠션의 스트로크 거리(20 ± 10 mm) 및 이동 속도(0.05 ± 0.03 m/s)로부터 근사적으로 계산된다. 본 연구의 사용된 현가장치의 감쇠기는 감쇠력을 제어하기 위하여 하드, 미디엄 및 소프트의 3 단계로 되어있다. 감쇠기의 감쇠력은 감쇠기의 운동 속도에 따라서 결정되기 때문에, 단품 성능 시험을 수행하여 감쇠력-속도의 관계를 도출하였다. 시험 결과를 적용하여 감쇠기의 시스템 모델을 구성하였다. 감쇠기 강도 별 시험결과와 시스템 감쇠기 모델의 결과를 비교하였다(Fig. 6). 압축 속도에 따른 감쇠력의 비선형 거동이 시험과 시뮬레이션 모델에서 동일한 결과를 보였다.

3. 시트 현가장치 시험 및 검증

상용차 시트 현가장치는 일정한 높이를 유지하는 기능과 차체의 진동으로부터 운전자를 보호하는 기능을 수행하여야 한다. 따라서 시트 현가장치의 성능을 평가하

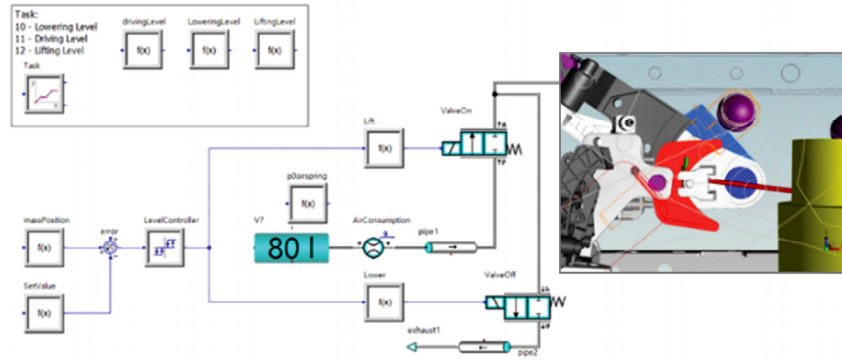


Fig. 5 Diagram of "Auto Leveling Valve"

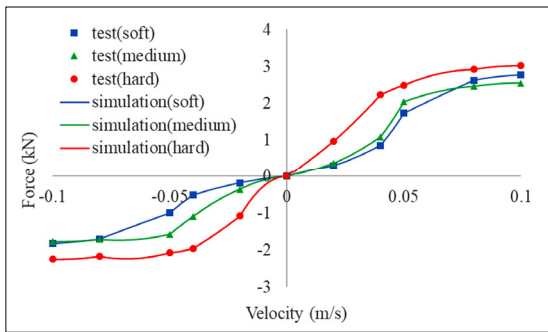


Fig. 6 Comparison of axial force-compression speed relationship of the shock absorber between test and simulation

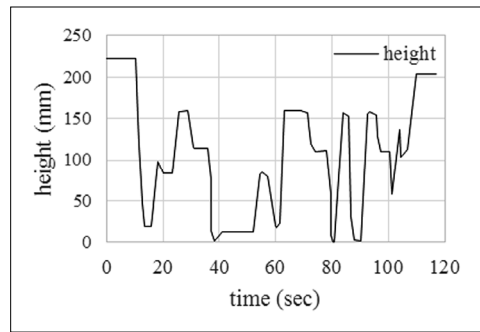
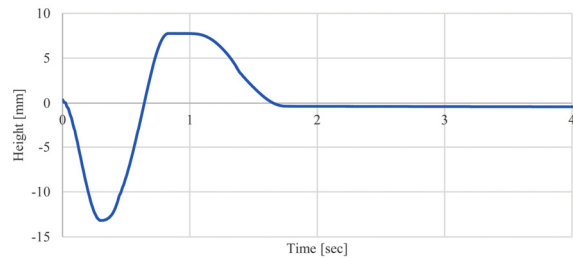


Fig. 7 Seat suspension verification

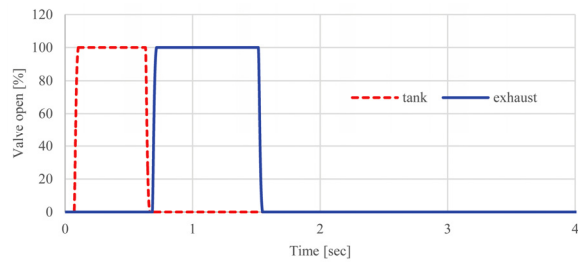
기 위해서 정적 평가 및 동적 평가를 수행하였다. Photo. 2는 정적/동적 평가를 위한 간이 시험 장비이다. 현가장치 위에 하중을 적용하기 위해서 무게 추를 올릴 수 있도록 되어 있으며, 동적 평가 시 가속도를 측정하기 위해서 현가장치의 상부 레일과 하부 레일에 각각 가속도 센서를 부착하였다.

3.1 시트 현가장치 정적 평가

일반적인 스프링은 하중에 따른 변위가 발생하여 하중 평형을 만족한다. 그러나, 운전석 시트는 운전자의 자세, 눈높이 등이 운전 환경에 영향을 주기 때문에 설계 단계에서 운전자의 위치가 중요한 설계 인자이다. 따라서 착좌 후 시트의 높이가 변하여 운전 자세가 바뀌는 경우 문제가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 상용차의 시트 현가장치는 자동 높이조절 장치를 사용한다. 정적 평가는 상용차 시트 현가장치가 외부 하중에 대하여 기준 높이를 복원할 수 있는가를 평가한다. 에어스프링의 작동 압력은 9 bar로 설정하고 하중은 75 kg 무게를 사용한다. 기준 위치는 하부 레일에서부터 110 mm이다. Fig. 7은 시트 정적 시험 결과이다. 하중이 30~38초, 70~80초에 초기 위치로 회복되었다. 시스템 현가장치 모델에 대하여 75 kg의 하중을 올려 복원되는 것은 확인하였다



(a) Seat height



(b) Air cell valve state

Fig. 8 Air suspension behavior by the Auto Leveling Valve

(Fig. 8). 기준위치에서 하중으로 인하여 현가장치의 높이가 12 mm 낮아졌으며 이때 에어탱크에서 에어스프링으로 공기가 유입되었다. 스프링 내부 압력 증가로 0.4초 이후 질량의 운동 방향이 위쪽으로 변경 되었으며, 0.6초 이

후 질량의 높이가 기준보다 높아져 스프링 내부의 공기가 배출되면서 압력이 낮아지고, 1.6초 이후에는 질량의 높이가 기준 위치로 수렴되었다.

3.2 시트 현가장치 동적 평가

동적 성능 평가는 진동판 위에서 평가된다. 상하 방향으로 가진 할 수 있는 진동판 위에 현가장치와 75 kg의 질량을 올려놓고 다양한 가진 입력에 대한 질량의 가속도를 측정한다. ISO2631에 따르면 운전자에서 인체가 가장 민감한 종방향 주파수 영역을 3~5 Hz이며 시트의 진동 절연 성능은 이 주파수 영역에서 가장 중요하다.⁴⁾ 시험에서 진동판의 가진은 3 Hz, 15 mm 크기의 사인파로 가진 하였고 현가장치의 상부 레일에서 전달된 가속도를 측정하였다. Fig. 9는 상부 레일에서 측정된 시험과 시뮬레이션 가속도 결과이다. 시뮬레이션에서 계산된 종방향 가속도는 5.7 m/s²으로 시험대비 약 1.7%의 차이를 보였다.

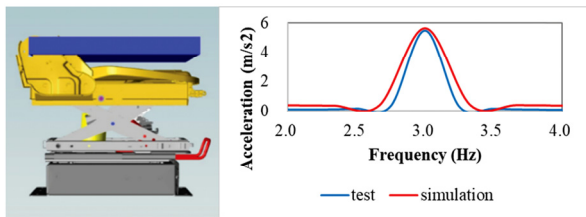


Fig. 9 Harmonic excitation of underbody frame model with 75 kgf dead weight

4. 결론

시스템 모델을 사용하여 에어스프링 타입 상용차 시트의 기본 구조에 대한 모델링을 구성하였다. 시트 프레임의 거동을 구현할 수 있는 Multi-link frame을 Cad data 기반으로 구성하였으며, Air spring-shock absorber system은 시험 데이터를 기반으로 성능을 검증하였다. 자동 높이조절 장치를 구현하기 위해서 Physics에 기반한 밸브라이브리리를 구축하여 제어할 수 있는 로직을 개발하였다. 완성된 시트 프레임 시스템 모델은 75 kg의 하중에 대하여 자동 높이조절 장치가 정상적으로 구동되는 것을

확인하였고, 진동에 대한 특성을 분석하였다. 주요 민감한 주파수 영역에 대하여 시스템 현가장치 모델이 시험과 유사한 성능을 보임을 확인하였다.

시스템 모델을 활용한 차량 역학 모델에 대한 연구는 상당한 진전이 있으나 실제 운전자의 안락감을 평가할 수 있는 인체, 시트 등에 대한 연구는 많이 부족하다. 특히 상용차의 경우 승용차와 운행 환경 운전 조건 및 시트 구조가 상이하여 기존의 승용차 기반의 안락감 분석으로 상용차의 안락감을 평가할 수 없다. 본 연구는 상용차 운전자의 안락감을 평가하기 위한 연구의 일환으로 시트 현가장치에 대하여 시스템 모델을 구성하고 검증하였다. 운전자의 주행 안락감을 평가하기 위해서는 시트 폼, 운전자 등에 대한 추가적인 시스템 모델의 개발이 요구된다.

후 기

본 연구의 일부는 홍익대학교 2016년도 학술진흥연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- 1) H. -K. Jang, "Design Guideline for the Improvement of Dynamic Comfort of a Vehicle Seat and Its Application," Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.4, pp.383-390, 2005.
- 2) Y. M. Han and C. G. Min, "Ride Quality Evaluation of Seat Suspension Adopting Controllable Damper," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.21, No.12, pp.1199-1205, 2011.
- 3) H. Liu and J. C. Lee, "An Experimental Investigation on the Characteristics of Automotive Air Spring," KSAE08-G0008, pp.4-8, 2008.
- 4) International Standard Organization ISO 2631-1, Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration, Part1: General Requirements, 1985.