

공기 스프링 서스펜션의 동적 모델링 및 적재 하중에 따른 승차감 분석

박 민 상¹⁾ · 이 치 범^{*1)}

서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과¹⁾

Dynamic Modeling of Air Spring Suspension and Ride Comfort Analysis under Varying Load Conditions

Minsang Park¹⁾ · Chibum Lee^{*1)}

Seoul National University of Science and Technology¹

Key words : AirSpring(공기 스프링), CarMaker(카메이커), MATLAB/Simulink(매투랩/시뮬링크), Polytopic Process(폴리트로픽 과정)

* 교신저자, E-mail: chibum@seoultech.ac.kr

기존 상용차 및 철도 차량에 주로 적용되던 공기 스프링 서스펜션이 최근 고성능 차량을 중심으로 그 적용 범위를 확대하고 있다. 공기 스프링은 전통적인 패시브 서스펜션에 비해 차량 하중 변화에 따른 차고 조절이 용이하며 승차감 향상에도 유리하다는 장점을 지닌다.

본 연구에서는 공기 스프링의 강성을 수학적으로 모델링하고 이를 MATLAB/Simulink 환경에서 구현하였다. 이후 CarMaker의 차량 모델과 Co-simulation을 통해 패시브 서스펜션과 공기 스프링 모델의 승차감 특성을 비교·분석하였다.

공기 스프링은 유체 역학 및 열역학 기반의 복합적 거동을 보이기 때문에 수학적으로 표현하기에 매우 복잡한 시스템이다. 대표적인 모델로는 Nishimura, VAMPIRE, SIMPAC, Berg 등이 있으며, 특히 차고 조절 기능을 구현하기 위해서는 공기 질량 유입을 반영할 수 있는 모델이 요구된다. 기본 Nishimura 모델은 공기 질량을 고정된 상수로 가정하여 외부 공기 주입에 따른 동적 거동을 반영하는 데 한계가 있으며 Berg 모델은 감쇠 특성까지 고려한 고정밀 모델이지만 파라미터 수가 많고 승용차에 적용하기에는 복잡성이 높은 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 질량 유입 항을 포함하면서도 구조가 비교적 단순한 VAMPIRE 모델을 기반으로 하여, 승용차용 공기 스프링 모델을 구성하였다.

VAMPIRE 모델은 폴리트로픽 과정을 가정하여 압력과 부피 관계를 $PV^\gamma = constant$ 로 정의하며 Fig.1과 같이 스프링 강성 및 댐핑을 모델링할 수 있다 [1].

성능 검증을 위해 CarMaker와 Simulink를 연동하여 승차감 비교 실험을 수행하였다. 실험은 대표적인 도로 충격 조건인 Bump Test로 설정하였으며 차량은 시속 30 km/h로 범프를 통과하였다. 차량 서스펜션은 각각 코일 스프링과 에어 스프링을 적용한 두 가지 모델로 구성하였고 차체의 수직 가속도를 측정하여 승차감을 정량적으로 비교하였다.

또한, 차량의 적재 하중을 0 kg, 100 kg, 200 kg으로 변화시키며 실험을 진행한 결과 코일 스프링은 하중 증가에 따라 차고가 감소하고 수직 가속도가 증가하는 반면 에어 스프링은 하중 변화에도 차고를 일정하게 유지하며 수직 가속도 변화 폭이 작아 다양한 하중 조건에서도 승차감을 안정적으로 유지하는 특성을 보였다.

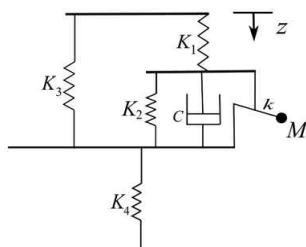


Fig. 1 VAMPIRE air-spring model [1]



Fig. 2 Bump Test in CarMaker

Reference

- [1] Sibi Kandasamy, Brynne Nicolsen, Ahmed A. Shabana, Giovanni Falcone, Evaluation of effectiveness of pneumatic suspensions: Application to liquid sloshing problems, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 514, 2021, 116328.

- [2] Bailey J. Adams, Development and analysis of a multibody dynamics suspension air spring model as a function of sprung mass, un-sprung mass, and design height, *SAE International Journal of Vehicle Dynamics Stability and NVH*, June 2024. DOI: 10.4271/10.08-03-0020.