

## 전기 자동차용 경량화 서스펜션 모듈 개발<sup>§</sup>

정윤식\* · 신헌섭\* · 임성수\*<sup>†</sup> · 최진환\*

\* 경희대학교 기계공학과

### Lightweight Suspension Module Development for Electric Vehicle

Yoon-Sik Jung\*, Heon-Seop Shin\*, Sungsoo Rhim\*<sup>†</sup> and Jin-Hwan Choi\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Kyung Hee Univ.,

(Received December 28, 2012 ; Revised June 3, 2013 ; Accepted July 4, 2013)

**Key Words:** Air Spring(에어스프링), Air Suspension(에어서스펜션), Electric Car(전기자동차), Electric Car(유연 다물체 동역학 모델)

**초록:** 현재 전기자동차의 높은 에너지 효율 및 승차감을 모두 만족시키기 위해 경량 서스펜션 개발에 많은 초점이 맞추어 지고 있다. 개발되고 있는 경량 서스펜션중 rubber tube로 만들어진 에어서스펜션이 에너지효율 및 승차감을 만족시킨다고 평가 받고 있다. 본 논문에서는 높은 전장비의 특징을 가지는 전기자동차용 에어서스펜션을 개발하였다. 또한 실제 에어서스펜션의 성능 향상 연구를 위해 유연 다물체 동역학 모델(MFBD) 방법을 이용하여 모델링하였고, 에어서스펜션에서 중요한 역할을 하는 rubber tube의 경우는 FE기법을 통해 모델링 하였다. 에어서스펜션의 각 모듈 특성을 고려하여 모듈별 물성실험을 진행 및 물성치를 추정하였다. MFBD모델의 신뢰성 확인을 위해 물성치를 적용시킨 시뮬레이션 결과와 실제 실험결과를 비교하였다.

**Abstract:** To improve the energy efficiency and ride quality of an electric vehicle, it is highly desirable to develop a lightweight suspension system with high travel ratio. Air suspension systems with a rubber tube are often considered optimal for such requirements. In this study, a new lightweight air suspension system with high travel ratio was developed for use in electric vehicles. Furthermore, an FE-based multi-flexible-body dynamics (MFBD) model of the suspension system was developed as a tool for improving the design of an actual suspension system. The MFBD model includes the FE modeling of the rubber tube module as well as other essential parts of the air suspension system. The system parameters for the model were obtained from various experiments. The validity of the developed MFBD model was shown through a comparison between the experimental results and the simulation results.

### 1. 서 론

미래형 자동차는 전기에너지 사용과 함께, 배터리 효율 및 에너지 절약을 위해 경량화를 개발 목표로 하고 있다. 차체 경량화는 연비, 가속성능, 운동성능, 승차감 등 차량의 모든 성능에 영향을 미치는 중요한 요소이며, 전기 자동차의 동역학 특성에 맞는 서스펜션이 개발되어야 한다.<sup>(1,2)</sup>

자동차의 “차체”와 “하체”의 질량비율은 승

차감 확보에 제일 중요한 인자이며, 전기자동차의 개발 방향이 Unsprung Mass(Fig. 1 참조) 비율이 작아지는 방향으로 진행되면서 가볍고 승차감 확보가 유리한 에어서스펜션이 현재 가장 주목 받고 있는 기술적 대안이다.

주행 시, 공기저항을 최소화하여 에너지 효율을 증대하기 위해서는 차체의 높이를 낮추는 것이 바람직하다. 전기자동차는 내연기관을 대체하는 모터 구동방식으로 변경되면서 차체 설계사양이 변경되었고 이에 대응하기 위한 새로운 개념의 서스펜션 시스템이 필요하다. 본 논문에서는 전기자동차의 낮은 차체 형상조건과 초경량 중량비율 조건에서도 우수한 승차감을 확보할 수 있는 경량 에어서스펜션 모듈을 개발하고, 각 모듈 별로 물성

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, [ssrhim@khu.ac.kr](mailto:ssrhim@khu.ac.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

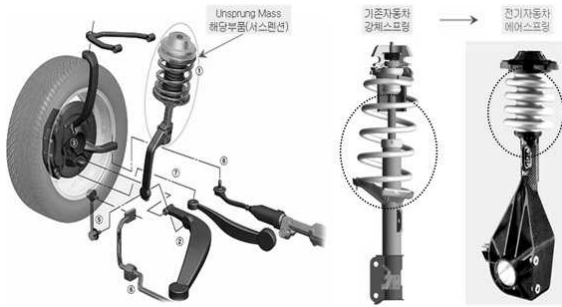


Fig. 1 Configuration of air-suspension system

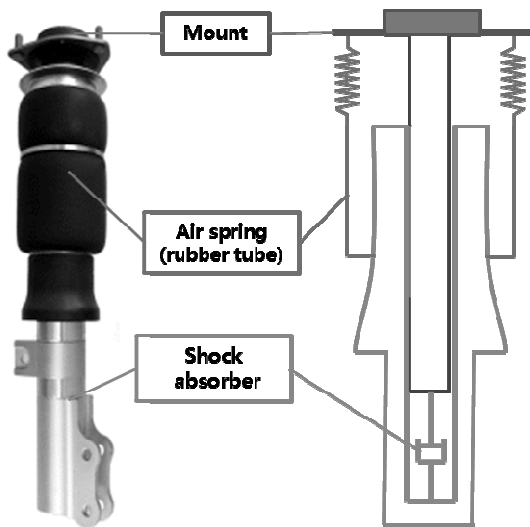


Fig. 2 Prototype photos and schematic diagram for the air suspension

치를 실험하고 그 결과를 이용하여 유연 다물체 동역학(MFBD)을 이용한 모델을 개발한다.

## 2. 에어서스펜션 모듈 제작

본 연구에서는 에어서스펜션 모듈의 구조적 특성을 고려하여 개념설계를 실시하여, 설계를 토대로 기초 부품설계 및 에어스프링을 개발하였다. 에어서스펜션은 크게 마운트, 에어스프링, 속업쇼버 부분으로 구분할 수 있다. 차량이 운행 중 노면의 상태에 따라 서스펜션에 힘이 가해질 경우, 에어스프링에서는 스프링 역할을 하고 속업쇼버에서는 속도에 따른 감쇠역할을 한다(Fig. 2 참조). 에어스프링부분에 속한 rubber tube의 소재는 압축 및 팽창을 반복적으로 하고 에어서스펜션 특징상 내구성 및 탄력을 모두 고려해야 한다. 이를 모두 만족하는 rubber tube를 개발하기 위해 소재 내에 tile 형식의 코드선을 내장하였고, 실험을 통해 적합성을 테스트 하였다. Fig. 3은 개발된 rubber tube

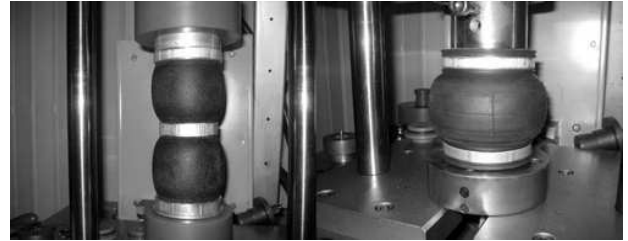


Fig. 3 Experimental set-up to estimate the mechanical properties of the air suspension system developed

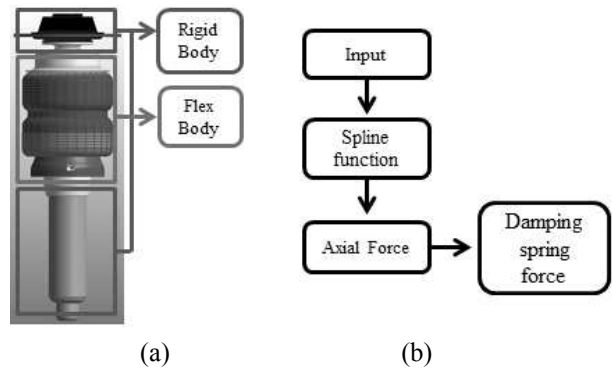


Fig. 4 (a)Multi-flexible-body (MFBD) modeling for the air suspension. (b)Applying nonlinearity force to modeling by using spline function

의 물성치를 구하기 위한 실험을 나타낸다. 속업쇼버는 운동에너지를 열로 변환하는 과정 중 발생하는 열이 에어스프링의 rubber tube에 내구성을 저하시키는 요인이 되어 열 방출 특성을 가지는 알루미늄 소재로 개발하였다. 개발된 에어서스펜션 모듈의 기계적 물성치는 다양한 실험을 통해 측정 및 계산 되었으며, 그 결과는 다물체 동역학 모델을 개발하는 바탕 자료로 활용되었다.

## 3. 에어서스펜션 모듈 다물체 모델링

### 3.1 Multi-flexible-body dynamics (MFBD) Modeling

개발된 실제 에어서스펜션 모듈의 기계적 물성치와 형상을 바탕으로 다물체 동역학 도구 RecurDyn을 이용하여 Fig. 4(a)와 같이 모델링하였다. 에어스프링의 마운트 부분과 속업쇼버 부분은 미소변형이 일어나는 재질로 되어있기 때문에 강체로 모델링을 하였고, 에어스프링의 rubber tube가 있는 부분은 변형, 팽창이 반복적으로 일어나기 때문에 그에 대한 stress 분포 결과를 확인하기 위해 유연체로 구성하였다. 각부분의 감쇠, 스프링 특성을 표현하기 위해 실제 실험결과를 적용하였으며, 비선형 특성은 Fig. 4(b)와 같이 spline function을 이용하여 axial force를 사용하여 모델링 하였다.

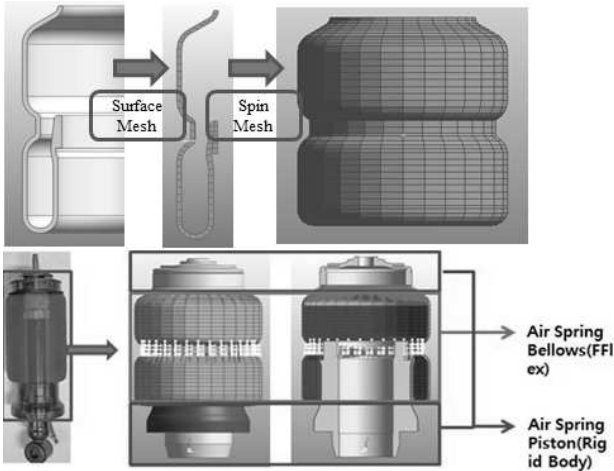


Fig. 5 FE modeling for the air spring

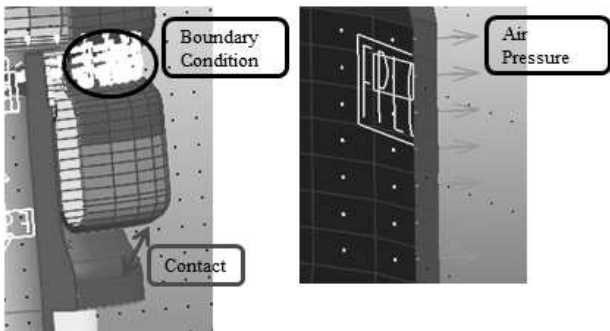


Fig. 6 Constraint modeling for the flexible body

에어스프링부분의 rubber tube 부분은 Fig. 5 와 같이 형상의 단면을 먼저 mesh 한 후, spin mesh 기능을 활용하여 유연체를 생성하였다. 위와 같은 방법으로 mesh 를 한 이유는, 일정한 형상의 육면체인 solid8(Hexa) element 로 구성하여 rubber tube 특성을 일정하게 적용시키기 위함이다. solid8(Hexa) 은 8 개의 꼭지점 node 로 구성되며 각 node 마다 x, y, z 방향의 자유도를 갖는 element 이다. 유연성을 가지는 유연체를 구속 시키기 위해 boundary condition 과 유연체의 patch 와 강체의 surface 에서 contact 을 생성하고 유연체 내부의 patch 에는 공기저항을 힘으로 입력하였다. (Fig. 5, Fig. 6 참조)

### 3.2 에어서스펜션의 물성치 추정

에어스프링 부분은 일반 서스펜션의 기능 중 스프링에 해당하는 부분으로 스프링 상수를 알기 위해 압축 인장실험과 변위입력에 대한 반력 실험을 시행하고 curve fitting 을 이용하여 에어스프링의 스프링상수를 도출하였다. (Fig. 7 참조) 에어스프링의 rubber tube 내의 공기압력의 변화는 변위에 대한 반력을 결정짓는 요소로 스프링의 물성치에 큰

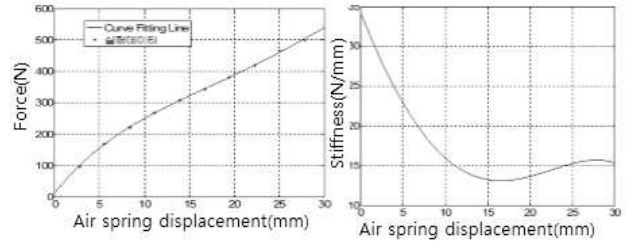


Fig. 7 Stiffness curve and spring coefficient displacement curve of the air spring

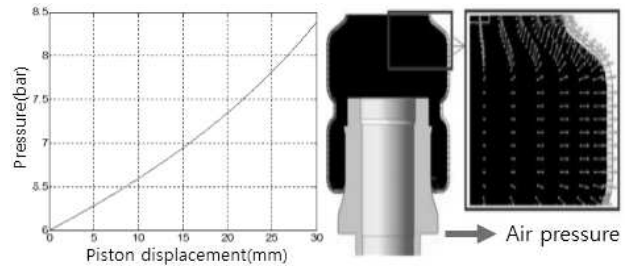


Fig. 8 Air pressure variation due to piston displacement and applied the air pressure to flexible model

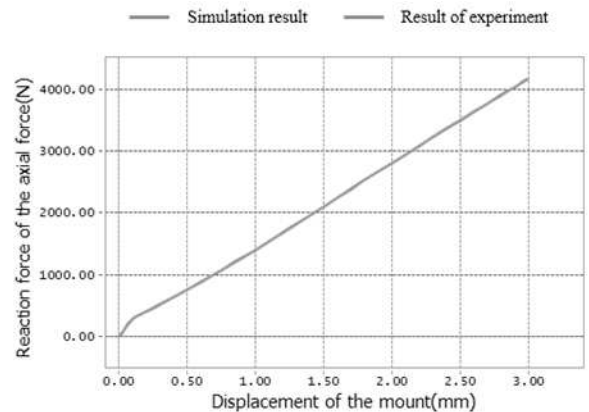


Fig. 9 Result comparison of the mount

영향을 주는 요소이다. Rubber tube 내의 온도가 일정하다라는 가정하에 압력과 부피의 곱은 일정한 것과 에어스프링의 하단 피스톤의 외관을 고려하여 rubber tube 내의 변위에 따른 압력변화를 추정하였다. (Fig. 8 참조)

### 3.3 Assembly modeling 및 simulation 결과

강체와 유연체의 각 부분을 모델링 한 후, 부분간의 사이에 접촉, 조인트, 힘 등의 구속 조건을 설정하여 assembly 과정을 거쳐 모델링을 하였다.

Fig. 9 는 마운트부분의 입력변위, 반응력에 대한 실험결과와 시뮬레이션한 결과를 비교한 그래프로 결과가 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 10 은 속업쇼버의 입력속도, 반응력에 대한 실험결과와 시뮬레이션한 결과를 비교한 것이다. 강체를 해석하는 에어스프링부분의 경우는 실제 실험에서 rubber

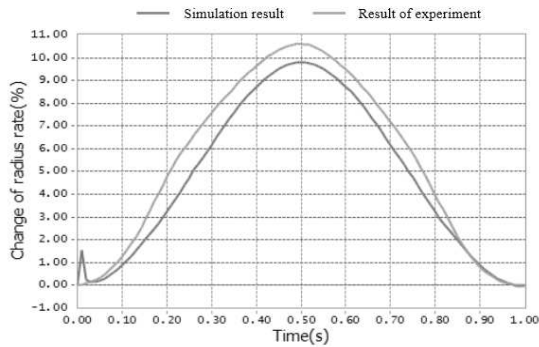


Fig. 10 Result comparison of the shock absorber

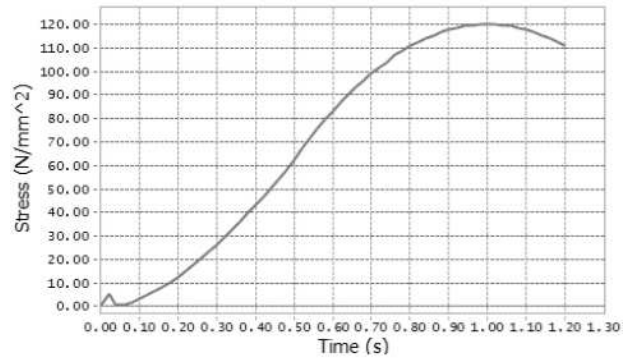


Fig. 14 Von-Mises stress of the rubber tube

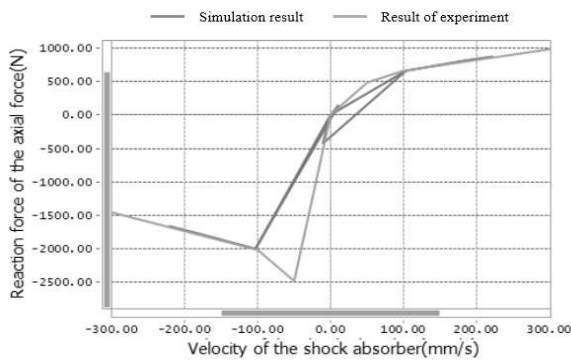


Fig. 11 Result comparison of the air spring

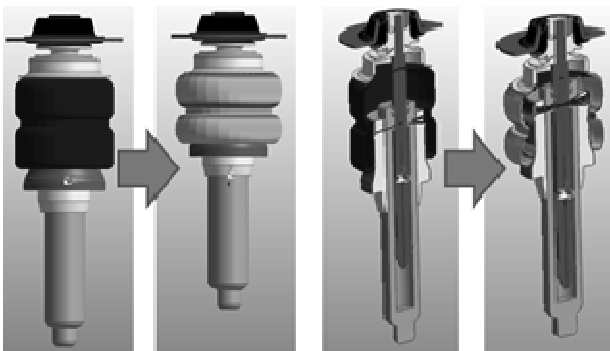


Fig. 12 contour results of air suspension module

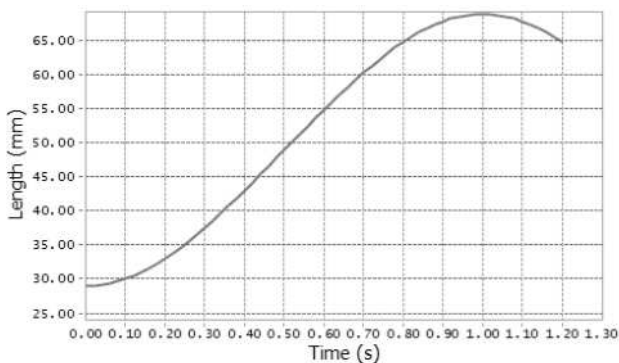


Fig. 13 Displacement of the air spring piston

tube 의 중심 축으로부터 반경 변화율과 시뮬레이션에서의 중심축으로부터 반경 변화율을 비교하였고 결과는 Fig. 11 에 나타나있다. Fig. 12 는 에어서스펜션 해석결과를 토대로 한 rubber tube 부분의 스트레스분포를 표시하는 contour 결과다. Fig. 13 은 에어스프링 하단 피스톤의 변위, Fig. 14 는 응력이 가장 높게 나오는 노드의 시간에 따른 Von-Mises 응력 변화 그래프이다. 응력의 변화의 최대값은 rubber tube 의 인장강도보다 약 7 배 높은 수치가 나왔으며 실제 실험과 모델링의 오차를 발생하는 이유는 FE modeling 의 한계에서 야기되었다고 판단할 수 있다. Rubber tube 를 모델링 할 때, 실제 rubber tube 에 삽입된 보강코드를 동일하게 모델링 하기에는 한계가 있었으며 유연체의 element 로 특수 rubber 의 물성을 모델링 하는 과정에서 실제 rubber 는 이방성 특성을 가지지만 물성치 측정의 한계로 인해 등방성의 물성치로 정의하여 오차를 발생시키는 요인이 되었다.

#### 4. 결 론

경량화된 전기자동차의 에어서스펜션 모듈 개발을 위해 시제품을 대상으로 각 모듈의 물리적인 특성을 실험을 통해서 측정하였으며, 결과를 토대로 필요한 특성들을 추정하였다. 각 모듈의 역할을 고려하여 마운트와 속업쇼버는 강체로 모델링 했으며, 에어스프링은 유연체로 모델링 했다. 측정 및 추정 결과를 적용하고 강체와 유연체 사이의 구속조건을 설정하는 작업을 통해서 각 모듈에 대해 모델링을 진행하였다. 위와 같은 방법을 통해서 유연 다물체 동역학 기법을 이용한 에어 서스펜션의 다물체 동역학 모델을 개발하였다. 개발된 모델에 대해서 실험결과와 해석 결과를 비교하는 것으로 검증은 하였다. FE modeling 한계에 의해 assembly 된 모델의 시뮬레이션 결과에 오차가 발

생하였다. 향후 과제로 에어 서스펜션에 사용되는 rubber tube의 특성과 불규칙성이 포함되어 삽입된 보강코드의 특성을 고려하여 본 연구를 보완할 것이다. 더 나아가 에어 서스펜션 모델을 실제 제품과 동일하게 모델링을 하고 가상 공간에서 여러 가지 경우에 대비한 해석을 하여 에어 서스펜션의 경량화, 성능 향상을 향한 개발을 진행 할 것이다.

### 후 기

본 연구는 중소기업청 산학연 공동기술개발사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Moshchuk, N., Li, Y. and Opiteck, S., 2011, "Air Suspension System Model and Optimization," SAE Technical Paper 2011-01-0067.
- (2) Sayyaadi, H. and Shokouhi, N., 2009, "New Dynamics Model for Rail Vehicles and Optimizing Air Suspension Parameters Using GA," *Mechanical Engineering*, Vo 16, No 6, pp 496~512.
- (3) RecurDyn<sup>TM</sup> Manual., 2012, <http://www.functionbay.co.kr>, FunctionBay, Inc.