

< 논문 >

## 승용차용 에어스프링의 유한요소해석 및 성능시험

허 신<sup>†</sup> · 우창수<sup>\*\*</sup> · 한혁섭<sup>\*</sup> · 김완두<sup>\*</sup> · 김성수<sup>\*\*\*</sup>

(2006년 10월 12일 접수, 2007년 5월 23일 심사완료)

### Performance Test and Finite Element Analysis of Air Spring for Automobile

Shin Huh, Chang-soo Woo, Houk-seop Han, Wan-doo Kim and Seong-soo Kim

**Key Words:** Air Spring(에어스프링), Cord Reinforcement(코드강화), Finite Element Model(유한요소 모델), Static Stiffness(정적 강성)

#### Abstract

An air spring which is a part of the suspension system of automobiles is used to reduce and absorb the vibration and the noise. Main components of the air spring are a cord reinforced rubber bellows, a canister and a piston. The performance of the air spring are depended on configurations of rubber bellows, the angle and elastic modulus of cord. The finite element analysis are executed to predict and evaluate the load capacity and the stiffness. The design variables of air spring are determined to adjust the required specifications of the air spring. Several samples of the air spring are manufactured and experimented. It is shown that the results by finite element analysis are in close agreement with the test results.

#### 1. 서 론

차량의 2차 현가장치 부품 중의 하나인 에어스프링은 차량 운동에 수반되는 제반 진동·소음 및 전달력 등을 완화시켜 주며, 차량의 주행 안정성 및 승차감 향상에 중요한 역할을 수행하는 부품이다. 국내의 경우, 지금까지는 철도차량용 에어스프링에 대한 설계 및 제작에 대한 연구가 수행되어왔으나, 최근에는 전량 외국에서 수입되는 승용차 및 SUV용 에어스프링의 국산화 개발에 대한 관심이 고조되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 에어스프링은 코드로 강화된 고무 벨로우즈에 채워진 공기 압력을 이용하여 하중을 지지하고 진동을 감쇠시켜 준다. 주요 세부 구성부품은 상판, 고무벨로우즈, 하판, 보조고무스프링(Stopper) 등이다. 고무벨로우즈의 내부에는 고무보다 탄성계수가 훨씬 큰

보강코드가 삽입되어 있는 복합재료 형태를 띠고 있으며, 고무 층과 보강코드로 인하여 이방성과 비선형성을 갖게 된다. 에어스프링은 내부 압력 변화에 따른 수직지지하중과 수직 및 수평 방향의 강성 등이 주요 설계 변수이며, 고무벨로우즈의 형상, 코드의 각도, 고정 부위인 상·하판의 모양에 따라 특성이 바뀌게 된다.<sup>(3,4)</sup>

본 논문에서는 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>(5)</sup>를 이용하여 에어스프링을 모델링하고 해석을 수행하여 주요설계변수의 영향을 살펴보고 설계 모델을 완성하였다. 그리고 하중조건에 따른 수직지지하중, 수직방향 정강성 특성을 예측하였으며, 실제 시제품을 제작하여 특성 시험을 수행하고 해석 결과와 비교하여 최종적으로 설계 사양에 맞는 에어스프링의 설계 모델을 결정하였다.

#### 2. 에어스프링의 유한요소해석

##### 2.1 에어스프링의 구조 및 사양

Fig. 1은 리어 에어스프링의 주요 구성부품을 나타낸 것으로서 에어 벨로우즈, 캐니스터, 에어

† 책임저자, 회원, 한국기계연구원, 미래기술연구부

E-mail : shur@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7886 FAX : (042)868-7933

\* 한국기계연구원 미래기술연구부

\*\* 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

\*\*\* 주식회사 만도, 중앙연구소

Table 1 Specifications of automobile airspring

종류	표준 높이 (mm)	최대 허용 변위		지지하중		
		인장 (mm)	압축 (mm)	CVW (kgf)	D W (kgf)	GVW (kgf)
Rear	211.4	49.6	77.5	461	488	815

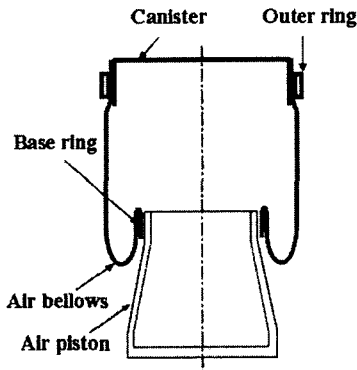


Fig. 1 Structure of automobile airspring

피스톤, 체결링 등으로 구성된다. 에어 벨로우즈는 고압으로 채워지는 고무로 보강하기 위해서 나일론 코드로 배열된 코르지가 사용되며 2장의 코르지 층으로 구성된다. 튜브의 외부 층과 내부 층은 고무로 되어있고, 중간에는 2장의 코르지가 축 방향을 기준으로 플러스 및 마이너스 각도로 배치되어 있어 공기 압력으로 인한 하중의 대부분을 지지하는 역할을 한다.

Table 1은 승용차용 Rear 에어스프링의 사양을 보이고 있다. 표준높이는 차량에 장착된 상태에서 표준이 되는 스프링의 높이를 의미하고, 최대 허용변위는 차체에 대한 바퀴의 최대 허용 인장(또는 압축) 위치에 대응하는 스프링의 최대 허용 인장(또는 압축) 시의 표준 높이에서의 변위를 의미한다. 지지하중은 공차 하중(Curb Vehicle Weight, CVW), 표준 탑승 인원 및 짐을 고려한 설계 하중 (Design Weight, DW), 만차 하중 (Gross Vehicle Weight, GVW)으로 나눈다.

2.2 보강코드 및 고무소재의 특성

에어스프링의 성능은 보강코드의 기계적 물성에 따라 크게 좌우되므로 보강코드의 정확한 기계적 물성을 측정해야 한다. 보강코드의 기계적

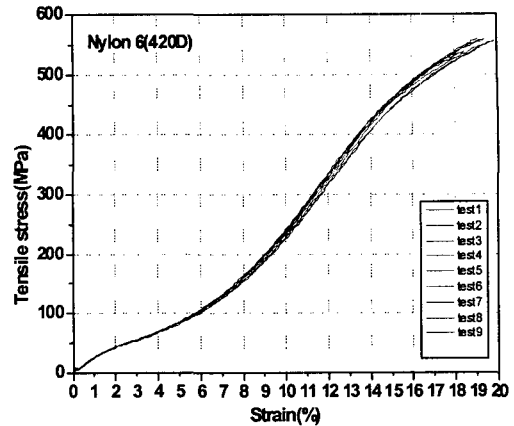


Fig. 2 Stress-strain curve of Nylon 6 cord

물성시험을 위해서 Instron 4301 시험기를 이용하였으며 ASTM D 855 시험 기준에 따라 시험을 수행하였다. Fig. 2는 Nylon6 보강코드의 인장시험을 10번 수행하여 얻은 응력-변형률 곡선이다. 초기 6 % 이내의 변형률에서는 고분자 사슬들의 재배열되는 영역으로 비교적 응력이 작게 나타난다. 따라서 정확한 탄성계수를 얻기 위해서 변형률 6 % 이상의 영역에서 기울기를 측정하여 계산한다. 탄성계수는  $E=4.49$  MPa, 최대 변형률은 19.3 %로 측정되었다. 보강코드의 포아송비는  $\nu=0.3$ 으로 추정한다.

또한 에어 벨로우즈 고무소재에 대한 단축 인장, 이축 인장시험을 수행하여 유한요소해석에 필요한 비선형 재료상수인 Moony-Rivlin 상수를 결정하였다. 변형률 범위 50%의 Moony-Rivlin 상수값은  $C_{10}=0.43$  MPa,  $C_{01}=0.00$  MPa이다.

3. 유한요소 모델링 및 해석

3.1 유한요소 모델링

에어스프링은 비선형 유한요소해석 도구인 ABAQUS를 사용하여 3차원의 1/2 대칭 모델로 작성되고 해석된다. 에어 벨로우즈는 S4R finite-strain shell 요소를 사용하여 모델링하고, 에어백 내부의 압력 및 체적 변화를 계산하기 위해서는 3차원 F3D3 및 F3D4 hydrostatic fluid cavity 요소를 사용한다. 에어 벨로우즈 내의 공기는 이상 기체로 모델링하고, 공기의 기준 밀도는  $1.204$  kg/m<sup>3</sup>, 온도는 23 °C, 대기압은 101.36 kPa을 사용

한다. 또한 에어 벨로우즈의 내부 및 외부 층을 구성하는 고무의 두께 및 비선형 특성인 Mooney-Rivlin 상수가 입력된다. 보강코드인 Nylon 6의 특성으로서 단면적, 코드 간격, 코드 각도가 입력된다. 코드각도는 에어 벨로우즈의 하부 영역에서 상부 영역으로 갈수록 증가하게 되는데, 이 값은 이론적인 코드각도 계산식을 이용하여 각 요소마다 코드각도의 변화를 설정하였다. 에어백과 공기 피스톤과의 접촉 모델링은 rigid element R3D4와 S4R shell 요소 사이에 접촉 쌍(contact pair)을 정의하여 표현한다. Fig. 3은 Rear 에어스프링의 유한요소 모델을 나타낸다. 1 단계의 해석에서는 에어스프링 양단의 자유도를 모두 고정 한 다음, 공기 압력을 제공한다. 2 단계의 해석에서는 표준 높이가 되도록 수직방향 변위를 제공하고 그 때의 지지하중이 설계 사양과 동일하도록 1단계의 공급압력을 조정한다.

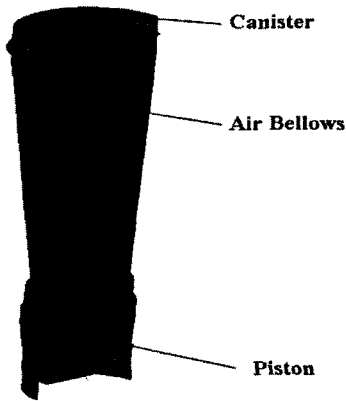


Fig. 3 FEA model of rear airspring

Element	Material	Thickness	Modulus	Poisson's Ratio
1-10	RUBBER	1.5	1.0E+09	0.45
11-20	NYLON	0.5	1.0E+09	0.35
21-30	RUBBER	1.5	1.0E+09	0.45
31-40	NYLON	0.5	1.0E+09	0.35
41-50	RUBBER	1.5	1.0E+09	0.45
51-60	NYLON	0.5	1.0E+09	0.35
61-70	RUBBER	1.5	1.0E+09	0.45
71-80	NYLON	0.5	1.0E+09	0.35
81-90	RUBBER	1.5	1.0E+09	0.45
91-100	NYLON	0.5	1.0E+09	0.35

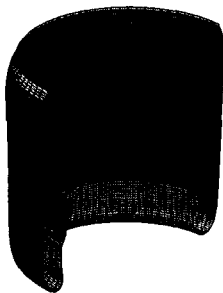


Fig. 4 Initial cord angle contour of air bellows

3.2 주요 설계변수 변화 해석

Fig. 4는 에어 벨로우즈의 초기 코드각도의 배열 상태를 보이고 있다. 하부 영역에서 상부 영역으로 갈수록 코드각도가 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 에어스프링의 제조과정에서 에어 벨로우즈가 금형에 삽입되고 성형되는 과정에서 에어스프링의 초기 코드각도가 축 방향에 대해서 하부 베이스로부터 상부로 갈수록 코드각도가 증가한 결과이다.

에어스프링의 특성을 지배하는 보강코드의 직경, 코드 간격 및 코드 각도 변화에 따라 특성의 변화를 살펴보았다. Fig. 5는 공차하중(CVW) 조건의 설계 높이에서 코드 직경이 각각 0.15, 0.25 및 0.35 mm일 경우에 대해서 해석한 결과로서 내부 압력은 최대 1.3 % 증가하였고 내부 체적 및 지지하중은 각각 최대 11.0 % 및 2.0 % 감소하였다.

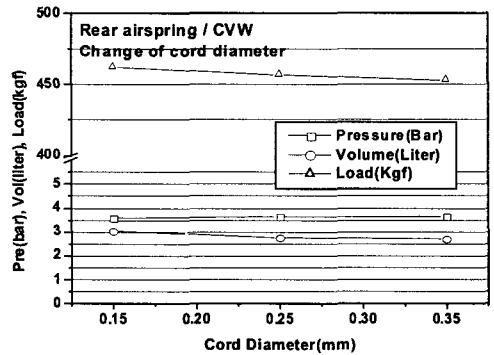


Fig. 5 Airspring properties variation for cord diameter change(cord angle 37°, EPI 64 ea/inch)

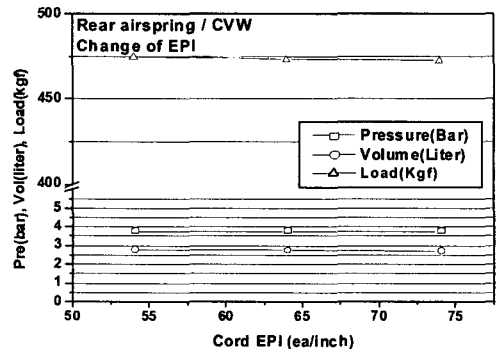


Fig. 6 Airspring properties variation for cord EPI change(cord dia. 0.25 mm, cord angle 37°)

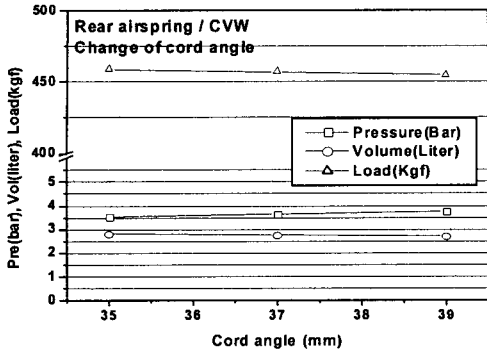


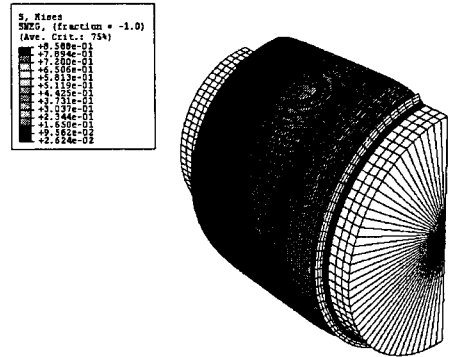
Fig. 7 Airspring properties variation for cord angle change(cord dia. 0.25 mm, EPI 64 ea/inch)

Fig. 6은 단위 인치 당 코드 개수가 54, 64 및 74 EPI인 경우에 대해서 해석한 결과로서 내부 압력은 변하지 않았고, 내부 체적과 지지하중은 각각 최대 1.4 %, 0.3 % 감소하였다. Fig. 7은 코드각도가 35, 37 및 39도 일 경우에 대해서 해석한 결과로서 내부 압력은 5.9 % 증가하였고, 내부 체적 및 하중은 각각 최대 4.6 %, 0.9 % 증가하였다.

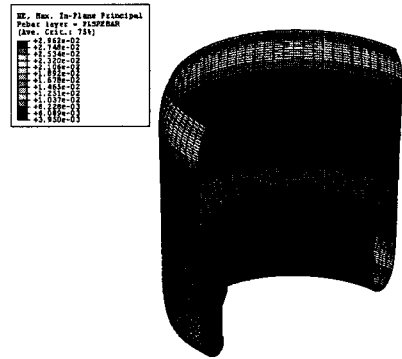
3.3 설계 모델의 해석 및 결과

주요 설계변수 해석 결과를 바탕으로 에어스프링의 성능사양을 달성할 수 있는 설계 변수를 결정하고 에어스프링의 설계 모델에 대한 해석을 수행하였다.

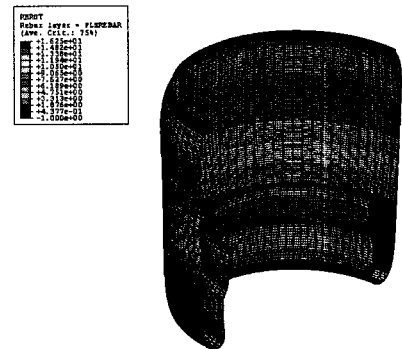
Fig. 8(a) 및 8(b)는 에어스프링에 대해서 하중 조건인 DW의 표준높이에서 에어 벨로우즈의 고무 응력, 코드 변형률 및 코드 각도의 변화를 보이고 있다. 표준높이의 공기 압력은 약 3.8 bar이다. 에어 벨로우즈의 고무 응력은 상부에서 최대 0.8 MPa이 작용하고 있다. 코드 변형률은 Fig. 8(b)에서처럼 에어 벨로우즈가 공기피스톤에 접촉하여 내려가기 전까지의 상부에 작용하며 그 값은 약 2.9 %이다. 코드각도 변화량은 Fig. 8(c)에서처럼 에어 벨로우즈가 공기피스톤에 접촉하기 전의 영역에서 최대 변화를 나타내고 있으며 그 값은 16.2 도이다. 에어 벨로우즈가 공기피스톤과 접촉하고 있는 영역 및 초기 코드각도가 큰 상부 영역은 코드 각도의 변화가 작지만, 공기피스톤과 접촉하지 않는 하부 영역은 초기 코드각도가 작기 때문에 코드각도의 변화가 더 크게 됨을 알 수 있다.



(a) Stress of the rubber



(b) Strain of the cord



(c) Variation of cord angle

Fig. 8 Properties contour of rear airspring(air pressure = 3.8 bar, design height of design weight)

4. 시제품의 성능 실험

4.1 성능시험 조건

승용차용 에어스프링은 철도차량 및 대형상용

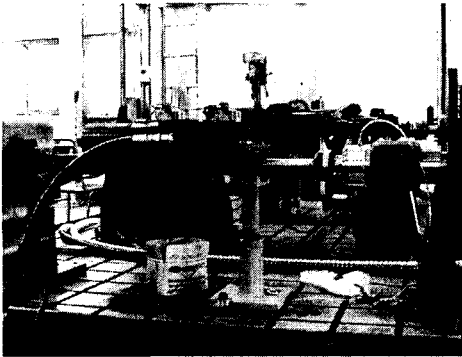


Fig. 9 The performance test of airspring

차용과는 달리 제한된 공간에 설치해야하고 요구하는 승차감을 확보하기 위해 적절한 형상과 강성을 가지도록 설계되어야 한다. 에어스프링의 성능시험은 하중조건에 관계되는 수직방향 지지하중과 승차감에 관련되는 수직방향 정강성 시험만을 대상으로 한다.

수직지지하중 시험은 에어스프링의 여러 가지 요구 성능 항목 중에서 가장 기본이 되는 시험항목이며 하중조건인 공차하중(CVW), 설계하중(DW) 및 만차하중(GVW) 조건에 따라 시험을 수행한다. 수직 정강성시험은 스프링을 설계 높이 (design height, DH)로 고정된 상태에서 공차하중 조건에 해당하는 스프링 하중이 될 때까지 스프링에 공기를 공급한 후 공급라인을 차단한다. 스프링을 진폭  $\pm 50$  mm 즉, Full Rebound(FR)는 +50 mm, Full Compression(FC)는 -50 mm, 주파수 0.01 Hz의 정현파형으로 2회 가진하는 동안 스프링의 변위, 하중, 내압을 측정하며, 측정 데이터는 최소 10 Hz의 샘플링 주파수로 수집한다. 설계하중 및 만차하중 조건에 대해서도 앞의 시험과 동일한 방법으로 수행한다.

Fig. 9는 에어스프링의 지지하중 및 정강성 특성 시험을 위한 시험장치의 구성을 보이고 있다. 시험장치는 유압 구동기, 하중계, 공기공급장치, 공기압 측정센서, 고정지그, 유압제어장치 등으로 구성되어있다. 하중 및 공기압의 측정 신호는 A/D 변환기가 있는 데이터 수집장치를 통해서 컴퓨터에 저장된다.

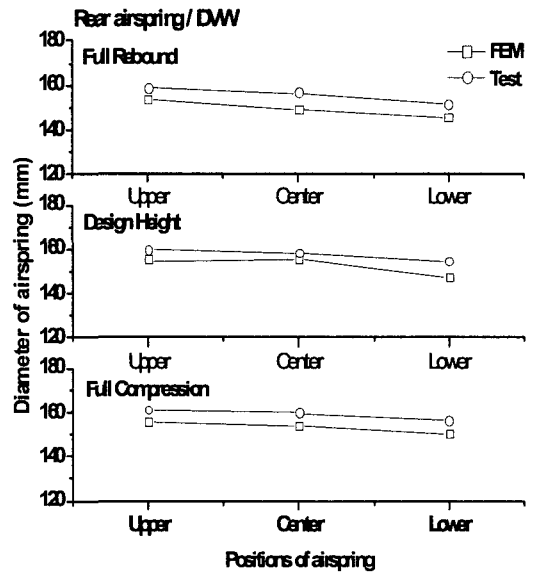


Fig. 10 Comparisons of test and F.E analysis for outer diameter of rear airspring

4.2 에어스프링의 시험 및 해석 결과 비교

Fig. 10은 에어스프링의 설계하중의 FR, DH, FC 조건에 대해서 외경 변화에 대한 시험 및 해석 결과를 비교한 것이다. FR 해석조건인 경우, 변형된 상태의 외경은 중앙부에서 최대 오차 4.9%가 발생했으며, 시험값의 변형보다 작게 나타났다. DH 해석조건인 경우, 변형된 상태의 외경은 하부에서 최대 오차 4.4%가 발생했으며, 시험값의 변형보다 작게 나타났다. FC 해석조건인 경우, 변형된 상태의 외경은 하부에서 최대 오차 4.0%가 발생했으며, 시험값의 변형보다 작게 나타났다.

Fig. 11은 에어스프링의 공차, 설계 및 만차 하중의 설계높이 상태에서 발생하는 지지하중에 대해서 시험 및 해석 결과를 제시된 성능사양과 비교한 것이다. 공차, 설계 및 만차 하중조건에서 시험 및 해석 결과의 최대 오차는 각각 0.1%, 1.5% 및 3.8%이었다. 또한 제시한 성능사양을 비교적 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12의 (a), (b) 및 (c)는 에어스프링의 공차 하중, 설계하중 및 만차하중 조건에 대해서 수직 지지강성에 대한 시험 및 해석 결과를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 공차, 설계 및 만차 하중

의 하중-변위 시험 곡선은 모두 이력현상을 보이고 있다. 이의 원인으로서는 공기의 특성 변화 및 고무 및 보강 코드의 비선형 특성에 따라 변형에너지가 소실되면서 발생한다. 그러나 유한요소해석에서는 이러한 특성을 반영하지 못하므로 해석결과는 이력현상이 나타나지 않는다. 또한, 최대 행정인 ±50 mm에서 지지하중을 비교해 보면, 신장 행정인 -50 mm에서는 해석결과가 시험 결과보다 크고, 압축 행정인 +50 mm에서는 시험 결과가 해석결과보다 크다. 이와 같은 결과는 유한요소해석에서 공기의 압축성 특성을 고려하지 못하므로 실제 공기의 압축 또는 팽창에 따른 열역학적 효과가 고려되지 못한 결과로 판단된다. 본 승용차용 에어스프링의 허용 행정은 ±20 mm 이므로 이 범위에서 지지강성을 계산하였다.

Table 2는 에어스프링의 정적 하중 시험 및 해석 데이터를 토대로 정강성을 계산한 결과이다. 정적 하중시험 및 해석 결과에서, 공차하중과 설계하중에서의 정강성 차이는 비교적 작으나, 만차하중의 정강성은 공차 및 설계 하중보다 상당히 큼을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 공차 및 설계 하중 조건인 Fig. 12(a) 및 (b)의 하중-변위 곡선에서의 지지하중보다, 동일한 변위 행정에서 만차하중 조건인 Fig. 12(c)에서의 지지하중이 더 크게 증가하였으므로 결국 정강성이 더 크게 증가하였음을 알 수 있다.

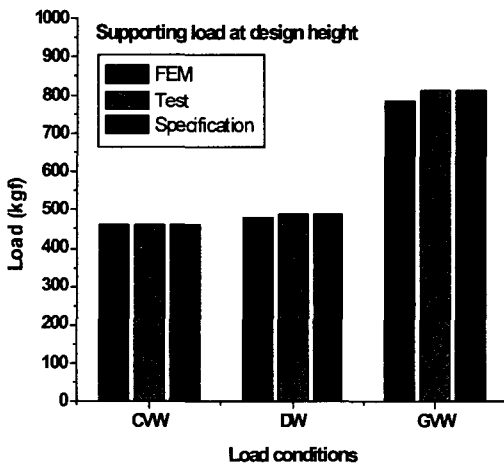
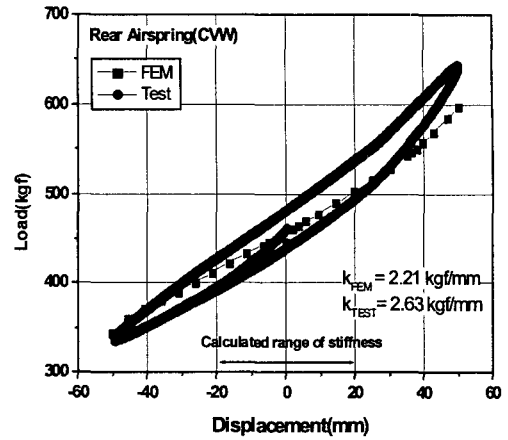
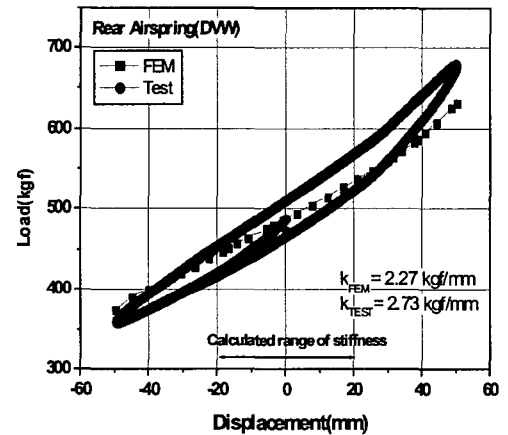


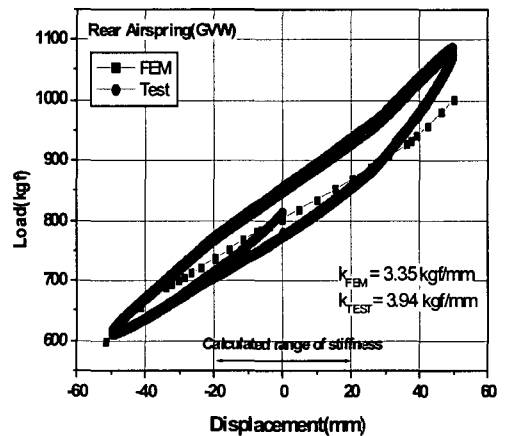
Fig. 11 Comparisons of test and F.E analysis for supporting load of rear airspring



(a) CVW



(b) DW



(c) GVW

Fig. 12 The stiffness comparisons of test and FEA results of rear airspring

**Table 2** Stiffness comparisons of rear airspring

Load type	Rear, Stiffness (kgf/mm)		
	Test	FEM	Er(%)
CVW	2.63	2.21	15.9
DW	2.73	2.27	16.8
GVW	3.94	3.35	14.9

공차, 설계 및 만차 하중조건에서의 정강성 시험 및 해석 결과의 오차를 비교해 보면 각각 약 15.9 %, 16.8 % 및 14.9 % 만큼 시험값이 더 크다. 이와 같은 오차의 원인을 분석해 보면 다음과 같다. 강성은 에어스프링의 힘과 변위와 관계 있고, 힘은 유효면적과 압력의 곱으로 정의되며, 유효면적은 외경의 제곱에 비례한다. 본 논문의 4.2절의 Fig. 10에서처럼 일정 하중조건에서 측정된 외경이 해석보다 약 4.5 % 정도 크므로 유효면적의 오차는 약 9 %가 발생하고, 결국 강성의 오차도 그 만큼 커지게 된다. 이와 같은 외경의 오차 원인으로는 에어백 제작 시에 삽입되는 보강코드의 배열각도는 설계도면과 같이 정확하게 배열되지 않는 경우가 많으므로, 해석 시에 에어스프링의 변형, 특히 외경에 상당한 오차를 발생시킬 수 있다. 또한 보강코드와 내부 공기의 비선형 특성을 고려할 수 없어 에어스프링의 변형에 영향을 줄 수 있어 강성의 시험과 해석값이 오차가 클 수 있다. 그리고 에어스프링의 모델링 및 해석결과는 시제품이 제작되기 전에 설계도면만을 참고하여 수행되었으므로, 시제품을 제작하는 과정에서 실제 제원은 설계도면과 차이가 발생했을 수도 있다.

**5. 결 론**

본 논문에서는 승용차용 에어스프링의 유한요소해석을 수행하고, 주요설계변수의 영향을 살펴보고 설계를 수행하였으며, 시제품을 제작하여 해석 결과와 시험 결과를 비교하였다.

(1) 에어스프링의 특성에 미치는 주요 설계변수 변화에 따른 해석결과는 코드의 배열 밀도보다는 코드의 외경 및 각도 변화가 에어스프링 성능에 상대적으로 많은 영향을 준다.

(2) 에어스프링의 설계하중조건에서 공차, 설계

및 만차 하중의 설계높이에서 지지하중에 대한 해석 및 시험 데이터를 비교한 결과, 최대오차 3.8% 이내에서 잘 일치하고 제시된 성능사양을 잘 만족하였다.

(3) 에어스프링 지지강성에 대한 시험 및 해석 결과에서 발생하는 오차는 결국 시험 및 해석 결과에서 측정된 외경의 오차가 주요 오차원인으로 판명되었다. 이러한 오차 요인으로는 에어백 제작 시에 삽입되는 보강코드의 배열각도가 설계도면과 같이 정확하게 배열되지 않는다는 점과 고무층 및 보강코드의 비선형성이 에어스프링 변형에 상당한 오차의 원인이 된다.

(4) 승용차용 에어스프링의 해석을 통해서 정확한 성능을 예측하기 위해서는 에어스프링의 초기형상 및 보강코드의 각도배열을 설계 도면대로 제작하였는지의 여부와 다면 승용차용 에어스프링의 설계 및 제작에 있어서 시간과 비용을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

**후 기**

본 연구는 수탁연구로 수행한 “차량용 에어스프링의 해석 및 시험평가기술 개발”에 대한 연구의 일부임을 밝히며 만도(주)에 감사드립니다.

**참고문헌**

- (1) Hur, S., Koo, J.S. and Woo, C.S., 1996, "Simulation of Static Characteristics Of Railway Vehicle's Air Spring," KIMM research report, Vol. 26, pp. 15~24.
- (2) Kim, W.D., Hur, S., Lee, H.J., Kim, S.W. and Kim, Y.K., 2000, "Evaluation of Characteristics of Cord Reinforced Airspring for Railway Vehicle," *J. of KSR*, Vol. 3, No. 3, pp. 109~116.
- (3) Berg, M., 1999, "An Air Spring Model for Dynamic Analysis of Rail Vehicles," KTH, Stockholm 1999, ISRN KTH/FKT/R-99/32-SE'.
- (4) Boros, A., Kovacs, F. and Lengyel, K., 1991, "Modelling of Axial-Symmetric-Fibre-Reinforced Rubber Membranes Loaded by Inner Pressure. Computer Simulation of Air-Springs," International Rubber Conference(IKT/IRC 91), pp. 487~489.
- (5) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1996. ABAQUS Example Problem Manual.