

자동차 현가장치를 위한 에어스프링 보강코드의 최적 성능평가

Optimum Evaluation of Reinforcement Cord of Air Spring for the Vehicle Suspension System

김병수¹, 문병영^{2,✉}
Byeongsoo Kim¹ and Byungyoung Moon^{2,✉}

1 인제대학교 기계자동차공학부 고안전차량핵심기술연구소 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, High Safety Vehicle Core Technology Research Center, Inje Univ.)

2 군산대학교 조선공학과 (Department of Naval Architecture, Kunsan Univ.)

✉ Corresponding author: moonby20@gmail.com, Tel: 063-469-1854

Manuscript received: 2010.5.25 / Revised: 2010.10.12 / Accepted: 2010.12.13

Air springs are prevalently used as suspension in train. However, air springs are seldom used in automobiles where they improve stability and comfort by enhancing the impact-relief, breaking, and cornering performance. Thus, this study proposed a new method to analyze air springs and obtained some reliable design parameter which can be utilized in vehicle suspension system in contrast to conventional method. Among air spring types of suspension, this study focused on sleeve type of air spring as an analysis model since it has potential for ameliorating the quality of automobiles, specifically in its stability and comfort improvement by decreasing the shock through rubber sleeve. As a methodology, this study used MARC, as a nonlinear finite element analysis program, in order to find out maximum stress and maximum strain depending on reinforcement cord's angle variation in sleeves. The properties were found through uniaxial tension and pure shear test, and they were developed using Ogden-Foam which is an input program of MARC. As a result, the internal maximum stresses and deformation according to the changes of cord angle are obtained. Also, the results showed that the Young's modulus becomes smaller, then maximum stresses decrease. It is believed that these studies can be contributed in automobile suspension system.

Key Words: Air Spring (공기 스프링), Rubber Sleeve (고무슬리브), Reinforcement Cord (보강코드), Cord Angle (코드각도), Finite Element Analysis (유한요소해석), Optimum Design (최적설계)

기호설명

W = strain energy function

μ_n, α_n = materials constant

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ = principal stretch

1. 서론

에어 스프링은 현재 철도차량의 2 차 현가장치로 널리 사용되고 있으나 자동차용으로는 사용이 아직 미비한 실정이며 사용되는 부품의 경우도 국내기술이 아닌 수입품이 대부분을 차지하고 있다. 철도차량용 에어 스프링 용도로는 많은 연구가 진행되어 왔으며¹ 다양한 형태로 진화되고 상용화되어 사용되고 있다. 자동차 분야로의 연구는 자동차의 고성능 유압 현가장치와 같이 오리피스형의 형

상개선을 통한 동적운동에 대한 감쇠성능을 개선² 시킨 연구사례가 있어 자동차용 현가장치로서 감쇠효과는 확인되고 있다.

그러나 철도차량의 용도로 사용되는 에어 스프링은 자동차 용도와는 근본적인 차이가 있으며 최근에는 차량용 엔진 마운트에 Mullins FEM 해석을 수행하고 MARC 프로그램으로 최적화된 고무물성을 연구한 사례가 보고되고 있다.³ 현재까지의 자동차 분야로의 응용은 거의 방진용도로 사용되고 있으며 승차감 개선용 에어 스프링에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 그리고 이차 현가장치 부품 중 하나인 차량용 에어 스프링을 사용할 경우, 지면충격완화 성능은 다른 종류의 현가장치보다 우수하여 승차감이 향상되며, 안정성이 향상된다. 그리고 지면과의 접지면 증가로 제동성능이 향상되며, 코너링 시 차량 기울임 방지로 코너링 성능이 향상된다. 또한 좌우 흔들림을 방지하여 차량안정성 및 승차감이 향상된다. 이러한 차량에의 적용에 대한 우수한 성능이 큼에도 불구하고 이에 대한 연구는 아직 본격적으로 수행되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서 에어 스프링을 차량 성능 개선에 적용하고자 하는 기초적인 성능연구를 수행하여 차량에 적용하고자 한다. 연구 방법은 비선형 유한요소해석 프로그램인 MARC 를 이용하여 자동차용 에어 스프링의 고무슬리브 보강코드의 각도 변화에 따른 비선형 유한요소 해석⁴ 을 수행하여 차량의 성능개선에 적용하고자 하였다.

2. 에어 스프링의 구조

에어 스프링의 종류로는 컨볼루션(convolution)형, 다이어프램(diaphragm)형, 롤링로브(rolling lobe)형, 벨로우즈(bellows)형, 슬리브(sleeve)형 등으로 나눌 수 있다.⁵ 그 중에서 차량용 슬리브형 에어 스프링의 주요 구성품은 상판, 하판 그리고 고무 슬리브가 있으며 고무 슬리브 내에 가해지는 공기압력으로 하중 및 진동을 감쇠시켜 안정성과 승차감을 향상시켜 준다. Fig. 1 과 같이 고무 슬리브는 고무와 보강코드인 나일론의 결합으로 이루어진 복합재료이며 고무 슬리브의 모양, 결합되는 나일론 코드의 각도에 따라 에어 스프링의 특성은 바뀌게 된다.⁵

본 논문에서는 차량에 많이 사용되는 Fig. 2 와 같은 형상의 슬리브형 에어 스프링을 해석 대상으로 하였다. 에어 스프링의 응력 및 변형에 영향을

주는 주요 변수는 코드 각도이며 변수의 영향은 유한요소 해석을 통하여 확인하였다.

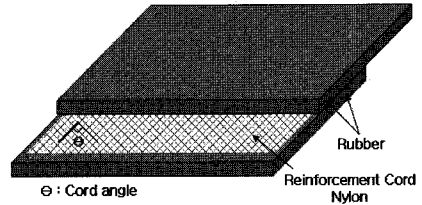


Fig. 1 Shape of rubber sleeve

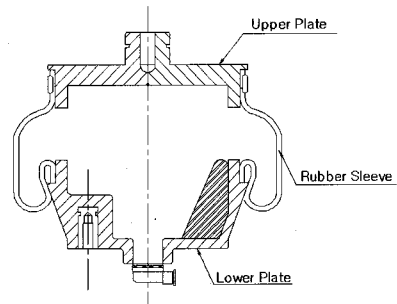


Fig. 2 Geometrical shape of sleeve type air spring

3. 슬리브 재료 물성시험

3.1 고무의 물성시험

고무부품의 물성을 얻기 위한 시험은 단축인장, 이축인장, 단축압축, 순수전단 시험 등이 있으며 단축인장 시험만 수행할 경우 고무 재료의 강성이 과평가 되는 경향이 나타나게 된다. 또한 단축압축시험의 경우 고무시편의 접촉면에 발생하는 마찰에 의해 순수한 압축응력-변형을 관계는 얻기 불가능하다.⁶ 따라서 본 연구를 위하여 단축인장과 순수전단시험을 수행하였다.

단축인장시험의 방법과 시편은 한국산업 규격 KS M 6518⁷ 과 ASTM D 412⁸ 에 나타나있으며 표준 습도(50±5%), 상온(23℃)에서 주어진 시험방법에

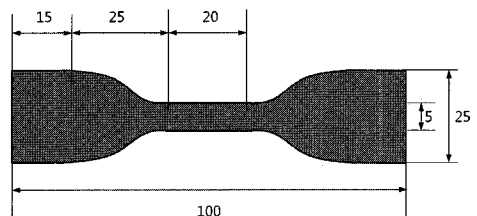


Fig. 3 Specimen for uni-axial tension test(unit:mm)

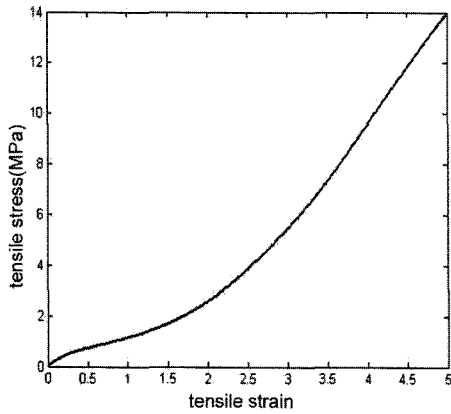


Fig. 4 Results of uni-axial tension test of rubber used in air spring

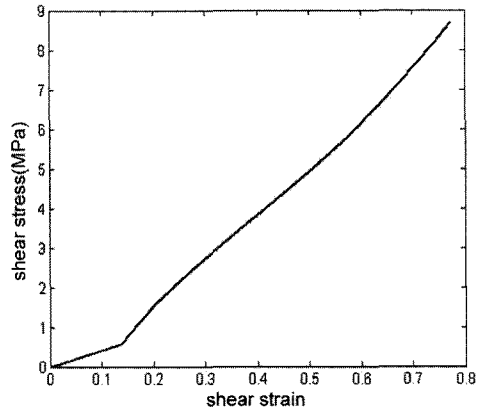


Fig. 6 Results of pure shear test of rubber used in air spring

따라 한국기계연구원에서 물성 시험을 수행하였다. 시편은 KS 규격의 아령형 3 호형을 사용하고 Instron 사(Instron , USA)의 500 N 인장 시험기를 사용하여 500 mm/min 의 속도로 500 % 변형률 범위에서 시험을 실시하였다. Fig. 3~4 는 인장시험 시편과 인장시험의 결과 그래프이다.

순수 전단시험을 위한 시편과 방법은 KS 나 ASTM 에서 제시하고 있지 않아 순수 전단 변형에 가까운 시편을 제작하여 실험을 실시하였다. 순수 전단 시험에서 인장을 할 때 시편의 양쪽면에서 순수 전단 변형 모드가 되지는 않지만 시편의 가로방향 길이가 세로방향 즉 인장방향의 길이보다 10 배 이상 크면 응력-변형률 곡선에 주는 영향은 무시할 수 있으므로 가로 100 mm, 높이 10 mm, 두께 1 mm 의 시편을 제작하고 시편 양면을 아크릴 판에 접착시키고 아크릴판은 시험기의 그림자에 물려 50 mm/min 의 속도로 시험을 실시하였다.⁹ 실험조건은 인장시험과 같이 표준습도(50±5 %), 상온(23 ℃)를 적용하였다.¹⁰ Fig. 5~6 은 순수전단시험 시편과 순수전단시험의 결과 그래프이다.

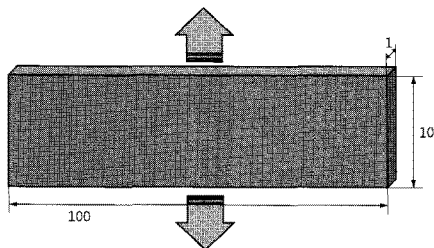


Fig. 5 Specimen for pure shear test (unit:mm)

3.2 보강코드의 인장시험

고무슬리브 내의 보강코드는 Fig. 1 에 보이는 바와 같이 나일론이 슬리브의 중간에 직물의 형태로 집착되어 있는 형태이다. 에어 스프링 고무슬리브의 주요 설계 변수가 코드각도이므로 일반적인 직물의 인장시험방법을 사용할 수 없어 KS K 0860 에 나와 있는 ‘컷 스트립법’을 사용하여 시험을 실시하였다.¹¹ 보강코드의 각도는 중심축을 기준으로 35°와 45°의 시험을 실시하였다. 보강코드의 각도는 기존 연구결과^{12,13} 를 통해 의미 있는 해석범위를 30°~50°로 설정하고 있기 때문에 이를 근거하여 본 연구에서는 크게 두가지로 나누어 35°와 45°를 선택하였다.

35°의 경우 인장시험결과 탄성계수 값이 99.82 MPa 에서 118 MPa 사이의 범위에서 관측되었으며

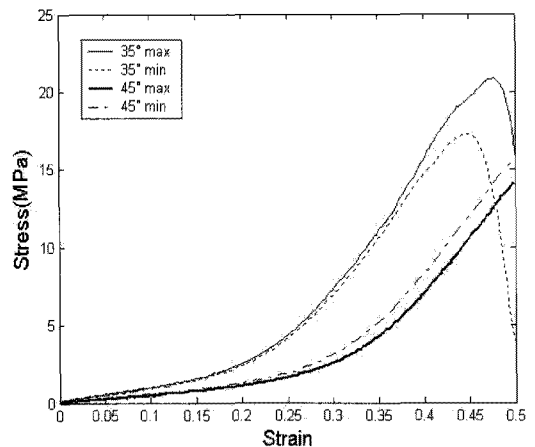


Fig. 7 Results of uniaxial tension test for Nylon

45°의 경우는 95.63 MPa 에서 96.03 MPa 사이에서 관측되었다. 이는 35°가 45°에 비해 축방향에 가깝기 때문에 인장방향에 더 강하게 나타난 것으로 판단된다.

본 연구에서는 35°와 45° 각각의 최대 탄성계수 값과 최소 탄성계수 값을 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 7 은 나일론 인장시험의 결과 그래프이다.

4. 에어 스프링의 유한요소 해석

4.1 고무슬리브의 모델링

고무슬리브의 외층은 CR 고무 층으로 되어 있으며, 중간에는 나일론 보강코드가 접착되어 있다. 고무슬리브는 CATIA V5 를 이용하여 모델을 생성하고 IGES format 으로 MARC 에서 인식하였다. 고무슬리브의 모델링은 2 차원 축대칭 요소로 하여 해석시간을 단축하고 해석이 용이하도록 하였다. 요소의 형태는 composite/gasket 152 (node 4)를 이용하였고 절점의 수는 492 개, 요소 수는 326 개이다. 내압은 2 bar 이며 고무슬리브의 변화에 따라 항상 수직으로 작용할 수 있도록 follower force 를 사용하였다. Fig. 8 은 축대칭 유한요소 모델이며 에어 스프링의 상판과 하판은 강체로 모델링하였다.

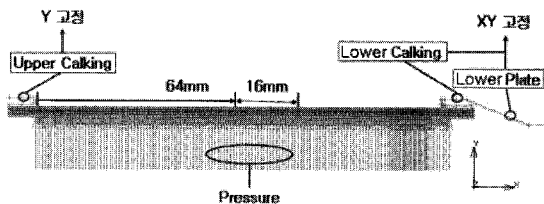


Fig. 8 Axisymmetric finite element model

4.2 재료상수의 결정

고무와 같은 탄성체의 거동 특성은 비선형성, 비압축성 및 대변형 특성을 나타내기 때문에 탄성체의 거동특성은 변형률 에너지 함수를 이용하여 표현할 수 있다. 본 연구에서는 식 (1)과 같은 Ogden 함수를 사용하였다.

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (1)$$

여기서 W 는 변형률 에너지, μ_n, α_n 은 각각 탄성체 거동 특성을 나타내는 재료상수로써 단순 인장 시험, 압축시험, 전단시험 등으로 얻어지는 응력-변형률 관계로부터 구해진다. 그리고 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ 는 탄성체의 변형률 불변량을 나타낸다. 본 연구에서는 고무의 비선형 재료 상수는 인장 및 순수전단 시험을 통하여 구한 응력-변형률 선도를 곡선적합 (curve fitting)하여 결정하였으며, 3 항 Ogden 재료상수를 이용하였다. Table 1 은 사용된 입력값을 나타낸다. 그리고 나일론의 탄성계수는 인장시험을 통하여 얻은 값을 사용하였으며 포와송 비는 0.3 이다.

Table 1 Material properties of rubber(Ogden parameters)

Number of terms	3		
Bulk modulus(Pa)	12607.5		
Error rate(%)	1.725		
Moduli(MPa)	μ_1	μ_2	μ_3
	-0.36073	-0.386998	-0.270914
Exponents	α_1	α_2	α_3
	3.20111	-6.88181	-4.52371

4.3 해석단계 결정

에어 스프링의 해석 단계는 4 단계로 나누어 수행하였다. 1 번째 단계는 에어 스프링의 초기단계에서 내압을 가한 상태, 2 번째 단계는 상판의 위치를 이동해주는 단계, 3 번째 단계는 내압을 제거해주는 단계, 마지막으로 내압과 상판의 위치를 더 이동시키는 단계이다. 3 단계까지는 에어 스프링의 제작단계이며 마지막 4 단계는 장착단계를 나타낸다. 단계별 움직임은 상판이 하판을 향해 이동하는 과정과 내압의 변화로 표현하였으며, 각 단계별 변위에 따른 해석을 수행하였다.

상판의 위치는 2 단계에서 에어 스프링의 장착까지 이동거리는 64 mm 이고 마지막 단계에서는 16 mm 이다. Fig. 9 는 축대칭 모델을 이용한 4 단계의 순차적 동적 변형거동을 나타낸다.

5. 유한요소 해석 결과 및 고찰

5.1 최대 응력 해석

에어 스프링의 주요 설계변수로 알려져 있는 보강코드 각도에 따른 고무슬리브의 최대응력 발생 부분과 해석단계에 따른 변화를 분석, 검토하

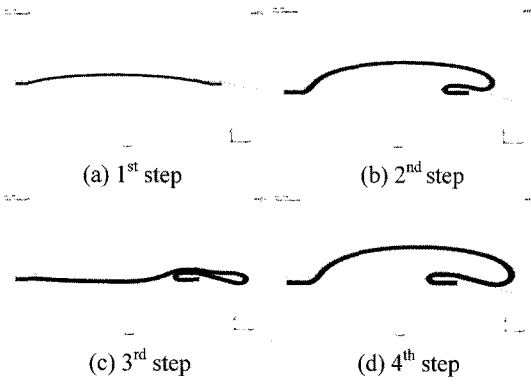


Fig. 9 Deformed shapes of the air spring

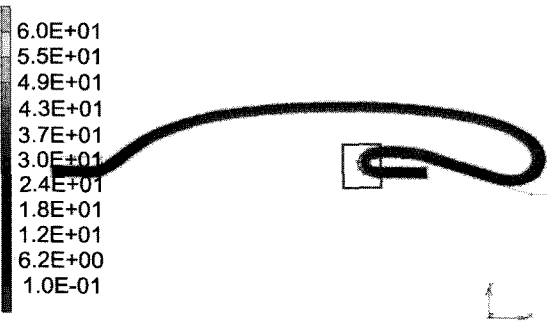


Fig. 10 The region of maximum stress and strain

였다. 실제 에어 스프링이 구동하고 있는 마지막 해석 단계에서 최대 응력이 발생하였으며 그 부위는 에어 스프링의 하판과 접해있는 부위로 고무슬리브의 모양이 가장 많이 변화하는 곳에서 발생한다. 이 결과를 통해 에어 스프링의 파괴가 일어나는 부위를 예측할 수 있다. 해석 결과 보강코드 각도가 증가함에 따라 탄성계수는 작아지며 고무슬리브에 발생하는 최대 응력 또한 작아지는 경향을 해석 결과로부터 확인할 수 있다.

Fig. 10 은 코드각도 변화에 따른 최대 또는 최소 탄성계수 값을 사용한 해석에서 최대 응력이 발생하는 부위의 von-Mises stress 분포를 나타내고 있다. 고무슬리브에 최대응력이 발생하는 부분은 형상 변화가 가장 많이 일어나는 하판과 결합된 부분임을 확인할 수 있었다.

5.2 최대 변형률 해석

에어 스프링의 최대 변형률은 최대 응력이 발생하는 부분과 같은 곳에서 일어나며 최대 응력과 같은 해석 마지막 단계에서 일어난다(Fig. 10). Table 2 는 보강코드의 각도(35°, 45°)에 따른 탄성

Table 2 Effects of cord parameters

Cord Angle	35° max	35° min	45° max	45° min
Young's Modulus(MPa)	118	99.82	96.03	95.63
Maximum stress(MPa)	60.79	50.84	48.76	48.58
Maximum strain	0.5067	0.5063	0.5061	0.5061

계수와 최대 응력 및 최대 변형률의 값을 보여주고 있고 Fig. 11 은 최대 변형률이 발생하는 절점의 해석단계에 따른 탄성 변형률값의 변화를 나타내었다. 이러한 결과로부터 보강코드 각도가 커지면 최대 변형률 또한 작아지긴 하지만 그 값의 차이는 아주 작았다. 해석결과로부터 최대 변형률이 발생하는 부분은 최대응력이 발생하는 부분과 일치하였으나 최대 응력과는 달리 보강코드 각도 변화에 따른 차이는 매우 작음을 알 수 있다. Table 2 에서 확인할 수 있는 바와 같이 45°의 보강 코드 각도를 가질때 최대 응력 48.58 MPa, 최대 변형률 0.5061 로 35°의 각도를 가지는 보강코드에 비해 최소의 응력/변형률을 나타냈다. 따라서 본 해석의 결과로부터 45°의 보강코드 각을 고무 슬리브에 적용하는 것이 내구성과 수명향상에 도움이 될 것으로 판단된다. 그리고 해석 결과에 대한 검증은 위해 결합부 부근의 요소 수를 800 개까지 메쉬 밀도를 증가시켰을 경우 최초 해석값과 차이가 1% 미만으로 나타나 신뢰도 높은 해석이 수행되었음을 알 수 있었다.

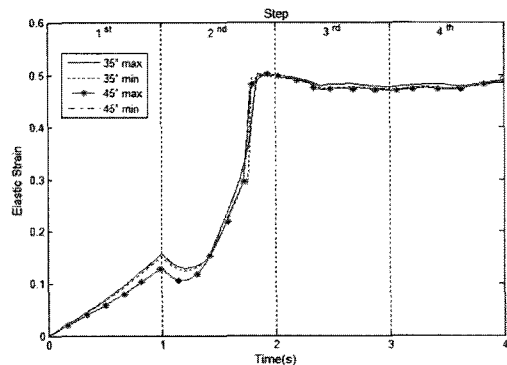


Fig. 11 Change of Elastic strain by analysis gradation of maximum strain node

6. 결론

본 연구에서는 차량용 에어 스프링의 성능검증

을 위해 비선형 유한요소 프로그램 MARC 를 이용하여 고무슬리브 보강코드의 각도의 변화에 따른 비선형 유한요소 해석을 수행하였다.

보강코드 각도에 따른 최대 응력과 변형률을 비교, 평가한 결과 보강코드 각도가 증가함에 따라 탄성계수는 작아지며 고무슬리브에 발생하는 최대 응력 또한 작아지는 경향을 해석결과로부터 확인할 수 있다. 또한, 고무슬리브에 최대응력이 발생하는 부분은 형상 변화가 가장 많이 일어나는 하판과 결합된 부분임을 확인할 수 있었다.

최대 변형률이 발생하는 부분은 최대응력이 발생하는 부분과 일치 하였으나 최대 응력과는 달리 보강코드 각도 변화에 따른 차이는 매우 작음을 알 수 있었다. 최대 응력 48.58 MPa, 최대 변형률 0.5061 의 값을 나타내는 45°의 보강코드 각도가 고무슬리브에 최적으로 적합함을 알 수 있어 현가 장치 설계에 응용이 가능할 것으로 보인다.

본 연구에서 고찰한 최적의 변수를 바탕으로 추후 에어 스프링의 지지하중과 강성 및 시제품에 대한 실험을 지속적으로 연구하여 검증하고자 한다. 본 연구는 철도차량에 널리 사용되고 있는 에어 스프링이 자동차 부품으로 확대 적용되는데 기여할 것으로 기대한다.

후 기

이 논문은 2008 년도 인제연구장학재단 국외연구 지원에 의한 연구결과이며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Woo, C. S., Kim, W. D. and Choi, K. J., "Reliability evaluation of air spring for railway vehicle," J. of the Korean Society for Railway, Vol. 8, No. 2, pp. 182-187, 2005.
2. Kim, I. S., Hwang, S. H., Han, M. S. and Koh, C. S., "The study on the improvement of dynamic characteristics with multi-orifice in air spring," Proc. of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Spring Conference, pp. 97-103, 2002.
3. MSC MARC, "MSC. MARC User's Guide," 2005.
4. Kim, B. S., Moon, B. and Kim, K., "A study on contact deformation of automotive door weatherstrip using non-linear finite element method," Trans. of KSAE, Vol. 13, No. 4, pp. 1-7, 2005.
5. Kim, W. D., Hur, S., Lee, H. J., Kim, S. W. and Kim, Y. G., "Evaluation of characteristics of cord reinforced air spring for railroad vehicle," J. of the Korean Society for Railway, Vol. 3, No. 3, pp. 84-91, 2000.
6. Kim, W. D., Kim, D. J., Kim, W. S. and Lee, Y. S., "A study on the equi-biaxial tension test of rubber material," Trans. of KSAE, Vol. 11, No. 5, pp. 95-104, 2003.
7. KS M6518, "Physical test methods for vulcanized rubber," 2006.
8. ASTM D412, "Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomers-tension," 2006.
9. Miller, K., "Laboratory characterization of elastomers for finite element analysis," Axel Physical Testing Service Conference, pp. 146-151, 2001.
10. ASTM E143-02, "Standard Test Method for Shear Modulus at Room Temperature," 2008.
11. KS K 0860, "Textiles-test methods for nonwovens-part 3 : Determination of tensile strength and elongation : Cut strip method," 2006.
12. Huh, S., Woo, C., Han, H., Kim, W. and Kim, S., "Performance test and finite element analysis of air spring for automobile," Trans. of KSME A, Vol. 31, No. 7, pp. 725-731, 2007.
13. Yang, W., Chen, C., Chen, Y. and Ren, Y., "Finite element analysis of an air spring for automobile suspension," Journal of Beijing University of Chemical Technology, Vol. 31, No. 3, pp. 105-109, 2004.