

## 철도차량용 원추형 고무스프링 특성 및 피로수명 평가

### Evaluation of Characteristics and Fatigue Lifetime for Conical Rubber Spring

우창수\*<sup>†</sup>, 박현성\*

Chang-Su Woo\*<sup>†</sup>, Hyun-Sung Park\*

**Abstract** Conical rubber springs are used in primary suspensions for railway vehicle. Conical rubber spring have function which reduce vibration and noise, support load carried in operation of railway vehicle. Prediction and evaluation of characteristics and fatigue lifetime are very important in design procedure to assure the safety and reliability of the rubber spring. The computer simulation using the nonlinear finite element analysis program executed to predict and evaluate the load and displacement for the conical rubber spring. The non-linear properties of rubber which are described as strain energy functions are important parameters. Also, fatigue lifetime prediction methodology of vulcanized natural rubber was proposed by incorporating the finite element analysis and fatigue damage parameter of maximum Green-Lagrange strains appearing at the critical location determined from fatigue test. Predicted useful lifetime of the conical rubber spring showed a fairly good agreement with the experimental fatigue lifetime.

**Keywords** : Conical rubber spring, Finite element analysis, Fatigue test, Fatigue lifetime prediction

**초 록** 본 연구에서는 철도차량 1차 현가장치에 사용되는 원추형 고무스프링에 대해 유한요소해석과 특성시험을 수행하여 수직방향, 길이방향, 횡 방향의 강성을 예측하고 평가하였다. 또한, 설계 초기 단계에서 짧은 기간에 고무부품의 피로수명을 예측할 수 있는 방법을 개발하여 원추형 고무스프링에 대한 피로수명을 평가한 결과, 실제 피로시험을 통해 얻어진 피로수명과 예측수명이 비교적 정확하게 예측됨을 확인하였다.

**주요어** : 원추형 고무스프링, 유한요소해석, 피로시험, 피로수명 예측

## 1. 서 론

철도차량의 1차 현가장치 부품인 원추형 고무스프링(conical rubber spring)은 차량의 주행 안정성 및 승차감에 중요한 역할을 담당하며, 차량의 운동에 따른 제반 정적 및 동적하중을 완화시켜 차량부품 및 궤도의 손상을 방지하고 승객과 화물에 전해지는 진동과 소음을 최소화 시켜 주는 역할을 수행한다. 최근 들어 비선형, 대변형 유한요소 코드의 발전과 고무 물성을 평가하는 다양한 모델 개발을 통하여 고무부품의 설계 및 해석에도 전산해석 기술이 이용되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 철도차량 1차 현가장치에 사용되는 원추형 고무스프링에 대해 유한요소해석과 특성시험을 수행하여 특성을 예측하고 평가하였다.

\*<sup>†</sup> 교신저자: 한국기계연구원 나노융합기계연구본부(cswoo@kimm.re.kr)

## 2. 원추형 고무스프링 특성 및 피로수명 평가

### 2.1 고무소재 재료상수

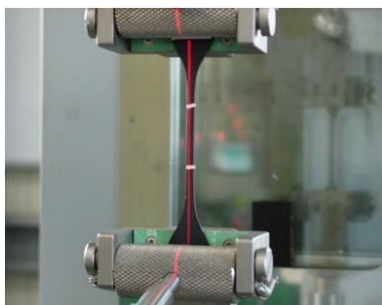
고무소재의 물성을 나타내는 재료상수는 고무부품의 특성해석에 필수적인 물성 데이터로 이 값의 변화에 따라 해석결과는 큰 차이를 나타내며 해의 안정성 및 수렴성에도 큰 영향을 미치게 되므로 정확한 재료상수를 결정하는 것은 매우 중요하다 하겠다. 일반적인 탄성재료는 하중을 가했다가 제거하면 하중과 변형이 선형적인 관계를 유지하는 범위 내에서 원래의 상태로 되돌아오는 탄성거동을 나타내지만 고무소재는 일반 탄성체와는 달리 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 대변형 범위에서도 탄성거동을 나타내는 초 탄성 특성을 지닌다. 이러한 특성은 다음과 같이 고무소재의 거동을 나타내는 변형률 에너지함수(strain energy function,  $W$ )의 계수로 표현할 수 있다.

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

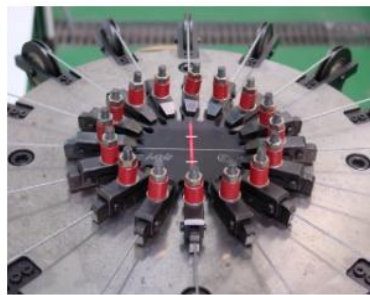
본 연구에서는 경도 60인 천연고무에 대해 Fig. 1과 같이 단축인장, 이축인장 및 전단시험을 통해 얻어진 응력-변형률 결과를 변형률 에너지함수로부터 구해진 응력-변형률의 관계식을 이용하여 Table 1에서와 같이 오그덴(Ogden) 3항의 비선형 재료상수를 결정하였다.

Table 1 Rubber material coefficient

Strain	Ogden function						
	$\mu_1$	$\alpha_1$	$\mu_2$	$\alpha_2$	$\mu_3$	$\alpha_3$	Go
%	1.422	3.66E-6	1.471	2.11E-5	1.377	2.514	1.731
50%	4.86E-5	0.869	1.662	1.811	0.607	3.04E-5	1.505
100%	0.078	4.543	6.874	0.083	1.410	1.234	1.334



(a) Uniaxial tension



(b) Equi-biaxial tension



(c) Pure shear

Fig. 1 Mechanical test of rubber material

## 2.2 원추형 고무스프링 특성평가

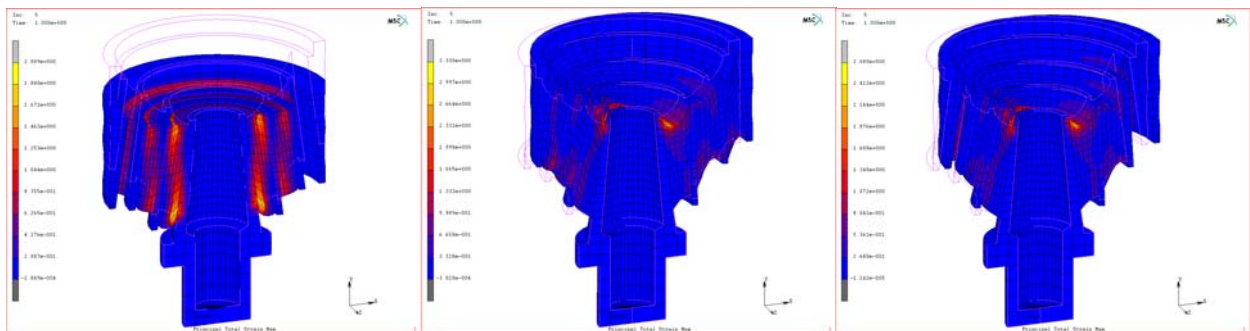
원추형 고무스프링은 Fig. 2에서와 같이 고무와 금속을 상호 접착하여 얻어지는 적층 고무를 동심원상 원추를 여러 개 삽입한 형상으로 바깥쪽은 액슬 박스(axle box)에 부착되고 안쪽은 대차 프레임에 고정되어 있는 형태로 고무와 금속이 3층으로 적층되어 고무 자체의 히스테리시스에 의해 댐핑효과를 일으켜 레일로부터 차체에 전달되는 소음을 절연하는 효과가 있으며, 조립방식과 형상에 따라 적절한 강성을 변화시킬 수 있어 고속주행에서의 안정성을 부여하며 곡선 주행 시 발생하는 횡압을 줄여 승차감을 향상시키는 역할을 담당하고 있다. 본 연구에서는 유한요소 해석법(finite element method)을 이용하여 철도차량용 원추형 고무스프링에 대해 특성해석을 수행하여 하중 또는 변위에 따른 특성과 최대 변형률이 발생하는 취약 부위를 예측하였다.

원추형 고무스프링은 수직방향, 축 방향, 길이방향의 특성해석을 수행해야 하므로 3차원으로 유한요소 모델링 하였으며, 고무소재 물성은 앞에서 구한 비선형 재료상수 값을 이용하였으며 금속부의 탄성계수는 206 Gpa, 포아송의 비는 0.3의 값을 사용하였다.

Fig. 3은 원추형 고무스프링에 대한 수직방향, 길이방향, 횡 방향에 대한 특성해석 결과로 최대 변형률 발생부위 및 크기를 파악하였으며, 각 방향에 대한 하중-변위 특성은 Fig. 4에서와 같이 길이방향, 횡 방향, 수직방향 순으로 강성이 크게 나타났으며 수직방향의 특성해석 결과와 특성시험 결과가 매우 유사하게 나타나 해석을 통해 원추형 고무스프링의 특성을 예측할 수 있었다



Fig. 2 Conical rubber spring for railway vehicle

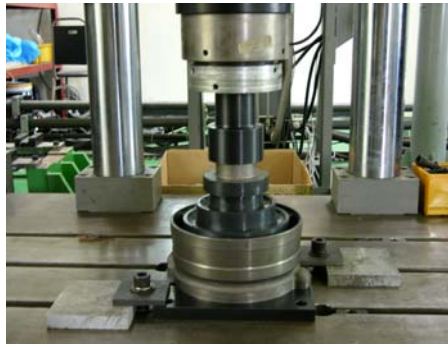


(a) Vertical direction

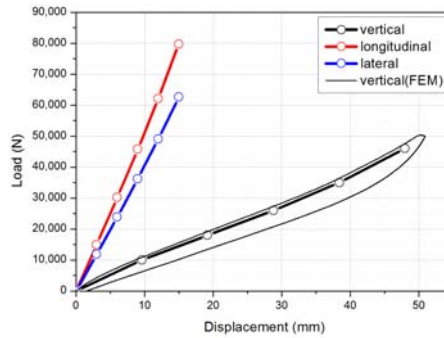
(b) Longitudinal direction

(c) Lateral direction

Fig. 3 Strain distribution of conical rubber spring



(a) Characteristic test



(b) Load-displacement curves

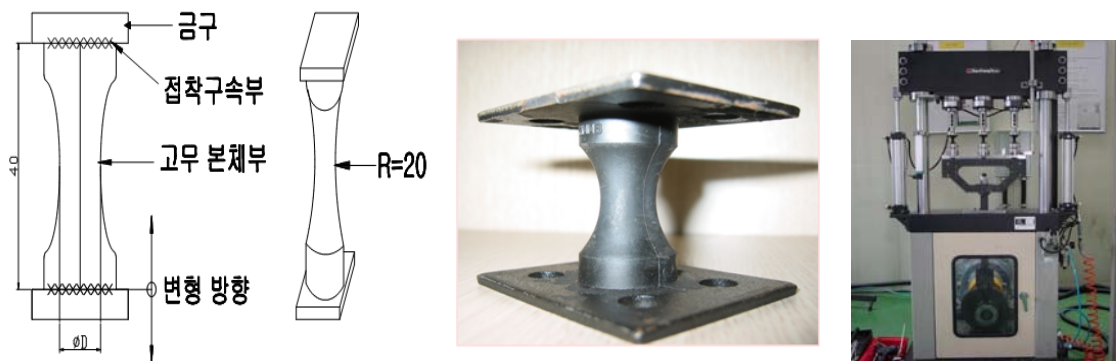
**Fig. 4 Characteristic test and load-displacement curves for conical rubber spring**

### 2.3 원추형 고무스프링 수명예측 및 평가

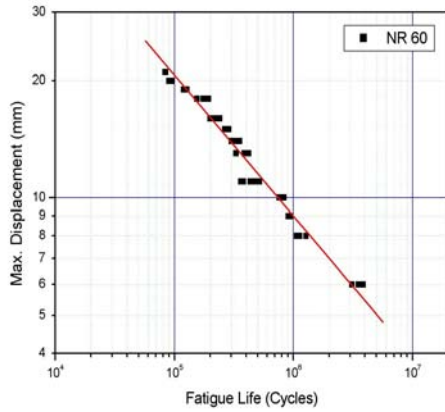
고무부품의 피로수명을 예측하기 위해서는 우선 동일한 고무재료의 피로 수명선도가 있어야 한다. 고무재료의 피로수명을 평가하기 위하여 종래의 덤벨형 시편을 이용할 경우에는 시편 피로시험과 제품의 피로시험 결과와의 상관성 유지가 어려워, 본 연구에서는 피로하중에 의한 최대인장 및 압축 변형률을 재현할 수 있는 고무 피로시편을 Fig. 5와 같이 설계, 제작하여 피로시험을 수행하여 Fig. 6(a)와 같이 최대인장변위와 피로수명과의 관계선도를 도출하였다. 또한, 피로시편에 대한 유한요소해석으로 구한 인장변위와 변형률과의 관계를 이용하여 Fig. 6(b)와 같이 그린-라그랑지 변형률(Green-Lagrange strain)과 피로수명과의 관계식을 도출하였다.

원추형 고무스프링에 대한 피로수명을 예측하기 위해 수직방향의 특성해석 결과로 최대 그린-라그랑지 변형률은 첫번째 적층부에서 약 0.296로 나타났다. 발생한 최대 변형률을 피로수명예측식에 대입하면 방진고무스프링의 피로수명은 약 500만회로 예측되었다.

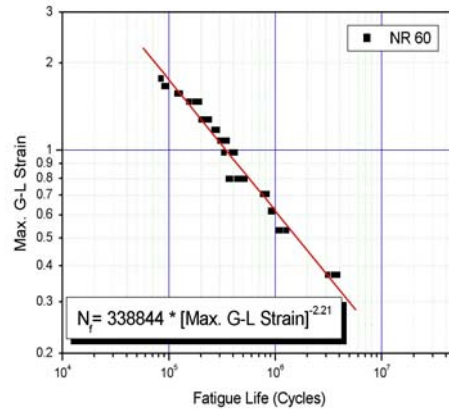
원추형 고무스프링에 대한 피로수명을 평가하기 위해 유압식 피로시험기를 이용하여  $32,950 \pm 9,806$  N의 하중을 3Hz로 300만회 피로시험 결과, 미소 크랙 및 파손이 발생하지 않았으며 시험 중 동 특성변화율은 5.1%, 스프링상수 변화율은 6.8%로 요구기준인 30% 이내였으며 크립 (creep)량도 6mm 이하로 기준을 만족하여, 본 연구에서 제안한 피로수명예측 방법으로 예측한 피로수명의 타당성을 검증하였다.



**Fig. 5 Three dimensional fatigue test specimen**



(a) Displacement and fatigue life



(b) Maximum Green Lagrange strain and fatigue life

**Fig. 6 Fatigue lifetime prediction curves for conical rubber spring**

### 3. 결론

본 연구에서는 철도차량용 1차 현자장치에 사용되는 원추형 고무스프링에 대한 유한요소 해석을 통해 특성을 평가하여 철도차량에 적합한 원추형 고무스프링을 설계할 수 있는 기술을 확보하였다. 또한, 설계 초기단계에서 비교적 정확하게 고무부품의 피로수명을 예측할 수 있는 방법을 제안하였으며, 고무시편 피로시험을 통해 도출된 최대 그린-라그란지 변형률과 피로수명과의 관계식을 이용하여 원추형 고무스프링의 피로수명을 예측하였으며, 원추형 고무스프링에 대한 피로시험을 통해 제안한 피로수명 예측방법의 타당성을 검증하였다.

### 후 기

본 연구는 본 연구는 중소기업청이 지원하는 구매조건부 신제품개발사업에 의해 수행되었고, 이에 감사를 표합니다.

### 참고문헌

- [1] R. K. Luo, W. X. Wu, P. W. Cook, W. J. Mortel (2004) An approach to evaluate the service life of rubber springs used in rail vehicle suspensions, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 218(2), pp.173-177.
- [2] R. K. Luo, W. X. Wu (2006) Fatigue failure analysis of anti-vibration rubber spring, *Engineering Failure Analysis*, 13(1), pp. 110-116.
- [3] R. K. Luo, W. X. Wu, P. W. Cook, W. J. Mortel (2003) Fatigue design of rubber springs used in rail vehicle suspensions, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 217(3), pp.237-240.
- [4] E. Frederick, C. Jane (2008) Degradation and life prediction of natural rubber engine mount compound, *Journal of Applied Polymer Science*, 10(1), pp.348-355.
- [5] C. S. Woo, W. D. Kim, J. D. Kwon (2008) A study on material properties and fatigue life prediction of natural rubber component, *Materials Science and Engineering*, 483-484, pp.376-381.