

# 철도차량용 방진고무부품 특성예측 및 평가

## Characteristic Prediction and Evaluation of Rubber Components for Railway Vehicle

우창수\*                      박동철\*\*  
Woo, Chang Su      Park, Dong Chul

---

### ABSTRACT

Rubber spring is used in primary suspension system for railway vehicle. This rubber spring has function which reduce vibration and noise, support the load carried in operation of rail vehicle. The non-linear properties of rubber which are described as strain energy function are important parameter to design and evaluate of rubber components. These are determined by material tests which are tension, compression and shear test.

The behaviors of load-displacement of rubber spring for rail vehicle are evaluated by using commercial FEA code. It is shown that the results by FEA simulations are in close agreement with the test results

---

### 1. 서론

고무는 일반 탄성체와는 달리 하중과 변형이 비선형 관계를 대 변형 범위에서도 탄성거동을 나타내는 초탄성의 성질과 진동 감쇄 특성으로 인하여 방진, 제진 및 밀봉 기능부품으로서 자동차·철도차량 및 각종 산업 기계류의 부품뿐만 아니라 우주산업이나 건축·토목분야에도 광범위하게 이용되고 있다 [1]. 최근에는 기계류 부품의 성능 향상 및 품질 고도화를 위한 저 진동, 저소음화를 위해 방진고무부품에 대한 고도의 해석 및 설계기술과 성능평가기술이 요구되고 있으나, 국내 제반 기술들은 다른 산업에 비해 폐쇄적으로 기술 발전이 이루어져 모든 면에서 매우 취약한 상태로 외국 업체의 부품을 수입하여 조립 판매하거나 모방 제조하는 실정으로 제품의 특성을 고려한 해석 및 설계기술 확보가 매우 필요하다고 하겠다.

지금까지 고무부품의 개발은 고무의 물성을 맞추기 위한 성분배합으로부터 형상설계·제작공정은 물론 시험평가 등 모든 과정을 경험적인 수법이나 실험에 의존하여 왔으나, 최근 들어 비선형·대 변형 유한요소 해석을 통한 고무재료의 거동을 해석하는 것이 가능해짐에 따라 고무부품의 설계에 체계적이고 분석적인 방법을 이용할 수 있게 되었다[2,3].

따라서, 본 논문에서는 철도차량의 주행 안정성 및 승차감 향상에 중요한 역할을 하며 차량과 승객의 안전에 직결되는 방진고무부품에 대해 고무재료 물성시험을 수행하여 유한요소 해석에 필요한 재료상수를 결정하였다. 이 재료상수를 이용하여 비선형 유한요소해석을 통하여 방진고무부품의 특성과 주요 설계변수의 영향을 파악하였고, 또한 시제품을 제작한 후 시험을 통하여 이를 검증하였다.

---

\* 한국기계연구원 구조연구부, 정회원

\*\* 동명특수고무 대표이사, 정회원

## 2. 철도차량용 방진고무 스프링

철도차량에 있어서 1차 천가장치용 방진고무 스프링은 대차의 고속주행 특성을 좌우하는 중요한 장치로서 액슬 박스(axle box)의 전후, 좌우방향의 운동을 억제하면서 상하방향은 스프링으로 완충작용을 하여 진동 및 소음 전달을 최소화하고 차량이 고속으로 안전하게 주행할 수 있도록 하는 역할을 담당하고 있다. 철도차량에 사용되는 1차 천가장치용 방진고무 스프링은 산형 단면의 고무와 강판을 교차로 적층하여 집속한 세브론 스프링(chevron spring)과 금속과 고무가 집속되지 않는 롤 고무 스프링(roll rubber spring)이 개발되어 사용되고 있다.

본 연구에서는 고무부분이 금속과 접촉되어 있지 않기 때문에 보수유지 시 고무만 교환함으로써 운용비용이 절감되며 전후, 좌우 강성이 부드러워 곡선 통과 성능이 우수하고 축 방향으로 유연한 스프링 특성을 나타내는 롤 고무 스프링에 대해 유한요소 해석을 수행하여 특성을 예측하고 이를 시험결과와 비교 검토하여 성능을 평가하였다.

롤 고무 스프링은 액슬 박스 당 2 세트로 구성되어 있으며 Fig. 1에서 보는 바와 같이 외측 하우징과 내측 실린더 및 고무 링으로 나눌 수 있는데 내, 외측 금속 면에는 고무의 미끄럼 방지와 비선형 특성을 나타내기 위하여 홈을 가공하였으며 고무 링의 형태는 타원형으로 이루어져 있다. 고무 링의 외경이 외측 하우징 내경보다 크기 때문에 내측 실린더와 치구를 이용하여 억지끼움으로 조립해야 하므로 고무의 형상 및 재질이 스프링 특성에 중요한 영향을 끼치게 되므로 롤 고무 스프링의 설계에 중요한 변수라 할 수 있겠다.

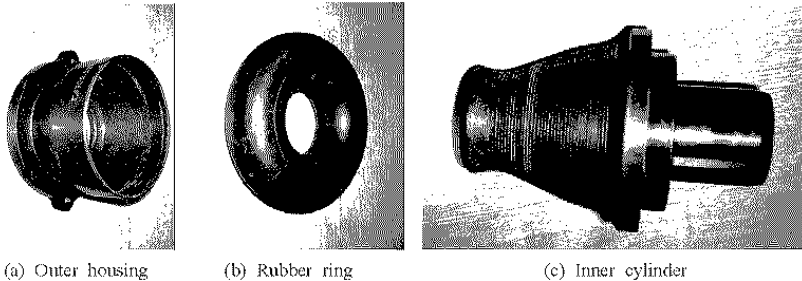


Fig.1 Roll rubber spring

## 3. 고무의 초 탄성 거동 및 물성시험

### 3.1 변형률 에너지함수

일반적인 탄성재료는 하중을 가했다가 제거하면 하중과 변형이 선형적 관계를 유지하는 범위 내에서 원래의 상태로 되돌아오는 탄성거동을 나타낸다. 그러나 고무재료는 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 데 변형 범위에서도 탄성 거동을 보이는 초 탄성 특성을 지니며, 이러한 재료의 거동은 변형률 에너지함수(strain energy function)  $W$ 로서 연신률 불변량 또는 주 연신률 함수로 나타낼 수 있다[4].

$$W = W(I_1, I_2, I_3), \quad W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 주 연신률이며, 재료가 등방성인 경우  $I_1, I_2, I_3$ 는 다음 식으로 정의되는 주 연신률에 대한 불변량이다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

한편, 대부분의 고무재료는 비 압축성이므로 체적계수는 전단계수보다 상당히 크며 재료가 많이 구속되어 있지 않은 경우에는 비 압축성의 가정이 타당함이 알려져 있다. 대표되는 변형률 에너지 함수는 연신률 불변량의 함수로 표시되는 다항식 형태(Rivlin)와 주 연신률의 함수로 표시되는 오그덴(Ogden) 함수가 있다.

$$W(I_1, I_2) = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (3)$$

$$W(\lambda) = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (4)$$

여기서,  $C_{ij}, \alpha_n, \mu_n$ 는 시험결과로부터 결정되는 재료상수이다.

### 3.2 고무 물성시험

고무부품의 유한요소해석에 필수적인 고무물성 데이터로 이용되는 물성치는 이 값의 변화에 따라 해석결과는 큰 차이를 나타내며 해의 정확성 및 수렴성에도 큰 영향을 끼치게 되므로 정확한 고무재료의 물성을 파악하는 것은 매우 중요한 일이다. 이러한 고무재료의 물성은 수치적으로 앞에서 언급한 변형률 에너지함수의 계수 값으로 표현되는데, 이 계수 값들은 여러 가지 다른 하중 상태에서의 재료시험을 통하여 구해진 응력-변형률의 시험결과를 변형률 에너지함수로부터 유도된 응력-변형률 곡선으로 모사하여 시험결과와 계산결과와의 차이를 최소화함으로써 결정된다.

일반적으로 알려진 고무 재료시험에는 단축인장압축시험, 이축 인장시험 및 전단시험 등이 있으나, 이축 인장시험은 복잡한 시험장치와 데이터처리의 어려움 등으로 인하여 비교적 시험이 단순한 인장-압축시험과 전단시험으로부터 재료상수를 결정하고 있다[5].

본 연구에서는 철도차량용 방진고무 스프링에 적용되는 고무재료인 경도 50, 60, 66인 천연고무 시편을 제작하여 단축인장-압축시험과 단순전단시험을 Fig. 2와 같이 실시하였다. 시험결과로부터 응력-변형률 데이터를 이용하여 재료상수를 결정하였으며 오그덴 함수를 적용한 경우가 시험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 이는 오그덴 함수의 응력-변형률 관계에서 연신율의 지수가 실수 값이므로 그 지수가 정수 값을 가지는 다항식 함수(Mooney-Rivlin)에 비해 곡선 적합이 유연성을 갖기 때문이다.

오그덴 함수는 최근 가장 많이 사용되고 있는 함수로 고무부품의 해석에 특성치로 자주 사용되

고 있으며 단순 인장의 경우 700배의 변형률까지도 잘 맞으며 미소한 압축성 재료에 대해서도 미  
 고력 잘 갖는 것으로 알려져 있어 본 연구에서도 오그래 함수의 재료상수를 각 경도별로 결정하  
 여 유한요소 해석의 물성 데이터로 이용하였다[6].

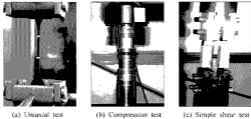


Fig. 2 Rubber material test

#### 4. 방진고무 스프링의 특성해석

##### 4.1 유한요소 모델

롤 고무 스프링은 원상 및 좌용하중이 축 대칭이기 때문에 계산의 편의를 위해 2차원 축대칭  
 요소를 이용하여 full-herrmann formulation quad 요소로 Fig. 3과 같이 모델화하였다.

고무 링은 변형에 집속요소(deformable contactbody)로 하였으며, 고무 링을 압입을 하기 위한  
 방법으로 강체요소(rigid body)를 이용하여 수직 및 수평방향으로 일정한 변위를 가한 후, 내측  
 실린더를 수평방향으로 변위를 주어 역지켜움을 나타내었다. 또한, 외측 리우경의 안쪽 면과 내측  
 실린더의 바깥쪽의 홈 기공은 다발계수를 변화하여 마찰효과를 나타내었다.

강속의 재료 물성치로 탄성계수는 21,000 kg/mm<sup>2</sup>, 포아손 비는 0.3으로 하였으며 고무의 물  
 성치는 비 압축성으로 가정하여 고무 특성시험에서 얻어진 3항 오그래 함수로 구해진 재료상수  
 값을 적용하였다. 유한요소 해석은 비선형 및 접촉 문제 해석이 용이한 상용 유한요소 코드인  
 MARC ver K6.2를 이용하였으며 HP9000 C180 기종에서 수행하였다[7].



Fig. 3 Finite element model of roll rubber spring.

## 4.2 유한요소 해석

롤 고무 스프링에 대한 유한요소 해석의 주요 관점은 외측 하우징의 내경보다 큰 고무 링을 압입할 경우 접촉면체의 수렴성과 하중이 작용할 때 고무 링의 변형 및 응력상태와 하중-변위 관계 등을 파악하여 정적 스프링 특성을 미리 예측하는 것으로, 강체요소를 이용하여 고무 링을 수직방향으로 일정한 변형을 압축한 상태에서 내측 실린더를 수평방향으로 변위를 주어 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 정도 66인 고무 링이 외측 하우징의 내경까지 압축되었을 때와 내측 실린더가 고무 링을 압입해 가는 경우의 변형모습을 나타내었다. 압입된 고무는 상당히 큰 변형을 나타낼 수 있었으며 이 때의 최대 변형율은 고무 링의 압축부위에서 1.76으로 나타났고, 최대 증가응력은 외측 하우징에서  $7.9 \text{ kg/mm}^2$ 의 값으로 계산되었다. 그림에서 보는 바와 같이 고무와 금속과의 접촉은 별 문제없이 잘 수행하여 상당히 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

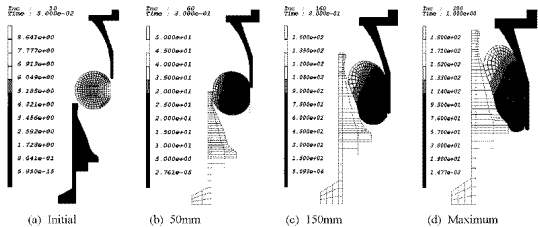


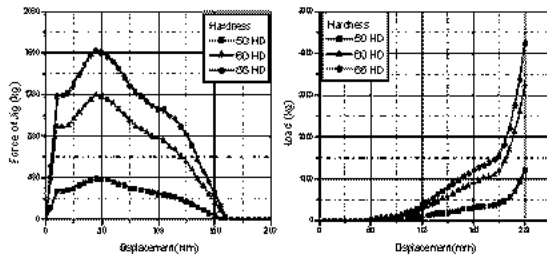
Fig. 4 Deform shape of roll rubber spring

Fig. 5에는 고무 링을 압축하고 지지하는데 필요한 지그(jig)의 하중이력과 스프링 특성선도류 나타내었다. 그림에서와 같이 정도가 낮을수록 고무링 압축하는 치구력은 작아짐을 알 수 있었으며, 정도 66인 경우에 하중값 내경인 8.6 mm 압축하는데 약 1.640 kg의 하중이 필요하고 내측 실린더가 외측 하우징에 어느 정도 압입되는 동안에는 거의 이 하중으로 지지해 주어야 함을 알 수 있어 실제 고무 링을 압입하기 위한 지그 설계에 상당한 도움이 되리라 사료된다. 또한, 고무 정도에 따라 스프링 특성의 차이가 심하게 나타남을 알 수 있었는데 정도가 높을수록 강성이 강한 스프링 특성을 나타내었다. 따라서 정확한 스프링의 특성을 파악하기 위해서는 고무 특성을 정확히 정의하는 것이 매우 중요한 사항이라 할 수 있겠다.

다음은 내측 실린더와 외측 하우징의 압축변에 후이 파져 있기 때문에 이를 고려하기 위하여 정도 66인 불성에 따라 계수값 0.3~0.6으로 변화하여 해석을 수행한 결과, 치구력 및 스프링 특성의 변화는 거의 나타나지 않음을 알 수 있었다. 또한, 고무 링을 수직방향으로 압축하는 깊이에 따른 영향을 알아보기 위하여 외측 하우징의 내경인 8.6 mm를 기준으로 하여 7.0~13 mm로 압축한 경우에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 6에서와 같이 압축 깊이가 깊을수록 수직 지그에 걸리는 힘은 증가하였으며 하중-변위 선도는 각 경우가 거의 유사한 경향으로 초기에는 유연하다가 고무 링이 어느 정도 압입된 시점부터는 강해짐을 알 수 있었다.

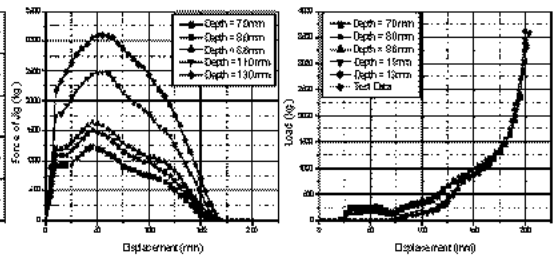
롤 고무 스프링의 특성은 그림에서 보는 바와 같이 유한요소 해석결과와 특성시험(test data) 결과가 잘 일치함을 알 수 있어 해석을 통해 롤 고무 스프링의 특성을 예측할 수 있었다.

이상으로 고무 링의 경도 및 압입깊이의 변화에 따른 치구력과 스프링 특성 및 취약부위를 유한요소 해석을 통해 시제품을 만들기 전에 미리 예측할 수 있어 방진고무 스프링 설계에 중요한 설계변수의 영향을 파악할 수 있어 고무부품의 성능향상에 크게 기여할 수 있으리라 사료된다.



(a) Jig force (b) Load-displacement

Fig. 5 Spring characteristics for various hardness



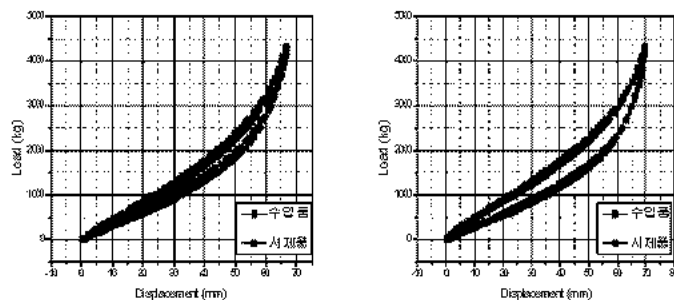
(a) Jig force (b) Load-displacement

Fig. 6 Results of the various compression depth

## 5. 특성시험 및 평가

방진고무 스프링에 대한 특성시험은 10톤 용량의 유압식 피로시험기(INSTRON 8501 model)를 이용하여 현재 전량 수입하여 사용되고 있는 수입품과의 개발품에 대해 정적 및 피로특성을 비교, 분석하여 성능을 평가하였다. Fig. 7(a)에는 축 방향 하중 0~4,240 kg 사이의 정적 스프링특성을 수입품과 시제품에 대한 특성선도를 나타내었는데 그림에서 보는 바와 같이 특성은 시제품의 강성이 약간 낮은 것으로 나타났으나 거의 유사함을 알 수 있었다. Fig. 7(b)는 정적하중 3,500 kg에 동적 하중  $\pm 810$  kg의 하중을 2.5 Hz의 시험조건으로 수입품과 시제품에 대해 100만회 피로시험을 수행한 결과로 수입품과 시제품의 피로시험 전과 100만회 시험 후의 스프링 특성은 거의 변화가 없었으며, 시험 후의 고무 링의 피로 파손도 전혀 일어나지 않음을 알 수 있었다.

따라서, 본 개발품의 내구성은 수입품과 비교하여 스프링 특성뿐만 아니라 외관상의 변화도 거의 없기 때문에 수입품의 내구수명인 8~10년을 충분히 만족하리라 사료되므로 성공적으로 롤 고무 스프링이 개발되었다.



(a) Static test (b) Fatigue test

Fig. 7 Results of static and fatigue test

## 6. 결론

철도차량용 방진고무부품 특성예측 및 평가에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 방진고무 스프링에 적용되는 고무재료를 이용하여 단순인장·압축시험과 전단시험의 특성시험을 수행하여 고무 재료상수를 구하였다.
- (2) 고무의 초 탄성 이론과 고무 특성시험을 통하여 얻어진 고무의 비선형 재료상수는 유한요소 해석에 필수적인 데이터로서 이 값의 변화에 따라 해의 안정성 및 수렴성과 해석결과에 큰 영향을 끼치게 되므로 정확한 재료상수의 결정이 매우 중요함을 알 수 있었다.
- (3) 롤 고무 스프링의 유한요소 해석 결과로 고무 경도에 따라 스프링 특성의 차이가 심하게 나타남을 알 수 있었으며, 해석결과와 특성시험결과가 잘 일치함을 알 수 있어 해석을 통해 롤 고무 스프링의 특성을 예측할 수 있었다.
- (4) 방진고무 스프링의 시제품을 제작하여 정적 및 피로시험을 수행한 결과, 수입품과 유사한 정적특성과 피로특성을 나타내었으므로 성공적으로 방진고무 스프링이 개발되었다고 사료된다.

본 연구를 통하여 전향 외국에서 수입하여 철도차량에 사용되는 방진고무 스프링에 대해 전산 시뮬레이션을 통해 미리 스프링 특성을 예측하고 평가하는 해석기술 확보로 독자적인 설계능력 향상으로 시제품 제작에 드는 막대한 시간과 경비를 줄일 수 있었고, 또한 고무부품의 성능평가 기술 확보로 성능 및 신뢰성 향상에 크게 기여하리라 사료된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 부품소재 종합기술지원사업 연구결과의 일부입니다.

## 참고문헌

- [1] A. N. Gent, R. P. Campion, G. J. Lake, etc., "Engineering with Rubber", Hanser Pub., 1992.
- [2] Antoun N., etc., "Applications of a Major FEM Code to the Stress Analysis of Rubber Parts", KGK 48, 1995.
- [3] H. Huh, H.W. Lee, S.H. Kim, "Finite Element Analysis for Deformation of Shell-like Rubber Structures", KSME, 97SS03, pp. 25 ~ 33.
- [4] Treloar L. R. G., "The Physics of Rubber Elasticity", 3rd ed., Clarendon press-Oxford, 1975.
- [5] Brown R. P., "Physical Testing of Rubber", 3rd ed., Chapman & Hall, 1990.
- [6] Mal Ajiz K., "Deformation of Elastic Solids", Prentice Hall, p. 162, 1990.
- [7] Kurt Miller, "Testing Elastomers for Hyper elastic Material Models in Finite Element Analysis", Axel Products Testing and Analysis Report, 2000.