

비선형·대변형 유한요소해석을 이용한 방진고무부품의 특성예측 및 평가

우창수* · 김완두* · 조성도성**

Prediction and Evaluation of Rubber Components using Large Deformation Non-linear Finite Element Analysis

Chang Su Woo*, Wan Doo Kim*, Seong Do Seong Cho**

Key Words: Rubber Component (고무부품), Finite Element Analysis (유한요소해석), Strain Energy Function (변형률에너지함수), Load-Displacement Curve (하중-변위 선도)

Abstract

The finite element analyses of mechanical rubber components are executed to predict the behavior of deformation and stress distribution in design step. The non-linear properties of rubber which are described as strain energy functions are important parameters to design and evaluate rubber components. These are determined by material tests which are tension, compression and shear test. The behavior of loads-displacements of rubber components such as a roll rubber spring and resilient ring and additional spring for railway suspension system 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 다른 탄성체와 달리 힘을 가하면 파손없이 500~900%까지도 쉽게 변형되며 힘을 제거하면 즉각 원상으로 복원되는 성질과 진동감쇄 특성으로 인하여 방진, 제진 및 밀봉 기능부품으로서 자동차·철도차량 및 각종 산업 기계류의 부품뿐만 아니라 우주산업이나 건축·토목분야에도 광범위하게 이용되고 있다⁽¹⁾.

고무부품의 개발은 고무의 물성을 맞추기 위한 성분배합으로부터 형상설계·제작공정은 물론이고 시험평가 등 모든 과정을 대부분 경험적인 수법과 실험에 의존하여 왔으나, 최근 들어 비선형·대변형 유한요소 코드의 발전과 고무의 물성을 평가하는 다양한 모델의 개발 등에

에 관한 많은 연구 진척을 통하여 고무부품의 설계 및 해석에도 전산해석 기술이 이용되고 있다⁽²⁾.

본 연구에서는 철도차량의 현가장치에 사용되는 방진고무부품을 대상으로 비선형·대변형 유한요소해석을 이용하여 특성을 예측하고 설계 요구조건을 맞추기 위한 방법을 제시하고자 한다. 사용된 고무 재질은 천연고무이며 경도 변화에 따른 특성을 평가하기 위하여 6가지 다른 경도의 시편을 제작하여 재료시험을 실시하였으며, 시험 결과로부터 유한요소해석에 필요한 재료상수를 결정하였다. 대상품은 액슬스프링의 일종인 Roll rubber spring과 감속기 고정 현가장치 부품인 resilient ring, 그리고 공기스프링의 보조스프링이며, 각 방진고무부품의 요구 특성에 맞는 재질을 선정하였으며, 선정된 재질의 시제품을 제작하여 특성시험을 실시하였다.

* 한국기계연구원 구조시스템연구부
삼성항공

2. 고무 재료시험 및 비선형 재료상수

2.1 재료시험 및 비선형 재료상수 결정

고무의 특성을 나타내는 재료상수를 구하기 위해서는 여러 가지 다른 하중상태에서의 재료시험이 실시되어야 하는데^[3], 특히 이 재료상수는 고무부품의 유한요소해석에 필요한 데이터로서 이 값의 변화에 따라 해석결과는 큰 차이를 나타내며 해의 안정성 및 수렴성에도 영향을 끼치게 된다. 변형률에너지함수의 상수를 결정하기 위한 시험에는 단축인장·압축시험, 이축인장시험 및 전단시험 등이 있다.^[4]

본 연구에서는 고무 물성 Data Base를 구축하기 위하여 경도가 다른 6종류의 고무시편을 제작하여 단축인장·압축시험과 단순전단시험을 실시하였다. 시험결과로부터 구한 응력-변형률 데이터를 이용하여 고무의 비선형 재료상수를 결정하였다. Fig. 1과 2는 각각 재료시험 모습과 시험 데이터를 3항 오그덴 함수로 커브피팅한 결과를 보여준다.

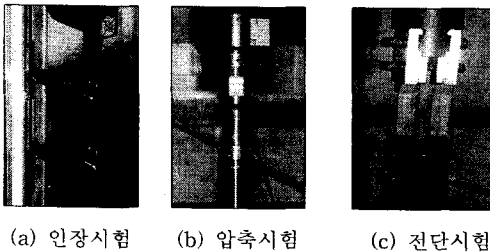


Fig. 1 Material Test of Rubber

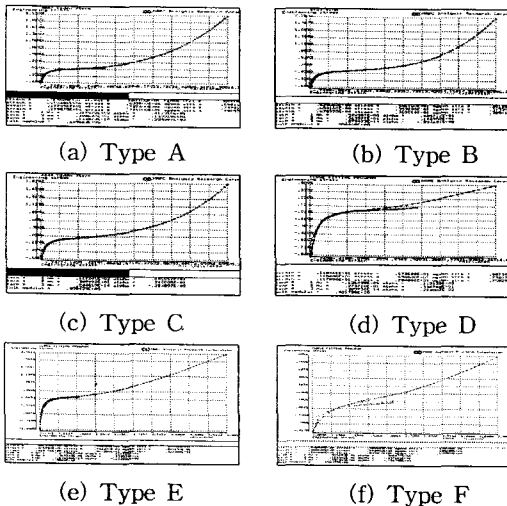


Fig. 2 Curve fittings of Ogden function

3. 철도차량 고무부품의 특성해석

3.1 개요

철도차량은 궤도상에 고정된 레일을 따라 고속으로 주행하는 수송시스템으로 차량의 안정성 확보 및 승차감 향상을 위해서는 승객이 편안하다고 느끼는 진동 범위 내로 현가장치를 설계하여야 한다. 따라서, 고무재료가 지닌 특수한 성질인 고도의 신장성, 탁월한 탄성 복원능력 및 진동 감쇄 특성으로 인하여 고무류 부품이 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 철도차량의 1차 현가장치인 액슬스프링의 일종인 roll rubber spring과 감속장치의 현가장치 부품 중의 하나인 여러 층의 고무판과 금속판이 접촉되어 있는 resilient ring, 그리고 철도차량의 2차 현가장치인 공기스프링의 보조 역할을 수행하는 보조스프링 등을 대상으로 유한요소해석을 수행하였다.

사용된 해석 코드는 MARC K7.2이며 해석은 HP C180에서 수행하였다^[7].

3.2 유한요소 모델링

3.2.1 Roll Rubber Spring

Roll rubber spring은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 금속과 고무가 접촉되지 않은 원추형(conical unbonded rubber spring)으로 유지보수 시 고무만 교환함으로써 경비가 절감되며 전후, 좌우강성이 부드러워 곡선통과 성능이 우수한 특성을 지니고 있다. 내, 외측 커버 사이의 고무부분의 회전과 특별히 배열된 내부 접촉면으로 인해 비선형 특성이 실현되기 때문에 축방향으로 유연한 스프링 상수를 얻을 수 있다.

고무 링의 외경은 외측 하우징의 내경보다 크기 때문에 내측 실린더와 치구를 이용하여 억지 끼움으로 조립되어야 하므로 고무의 형상 및 재질이 스프링 강성에 대단히 중요한 영향을 끼치게 되므로 설계에 중요한 변수가 된다.

유한요소 모형은 기하학적 형상을 고려하여 Fig.4와 같이 2차원 축대칭 요소를 이용하여 full-herrmann formulation quad 요소로 모형화하였다^[6]. 고무는 변형체 접촉요소(deformable contact body)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 억지 끼움 현상을 나타내었다.

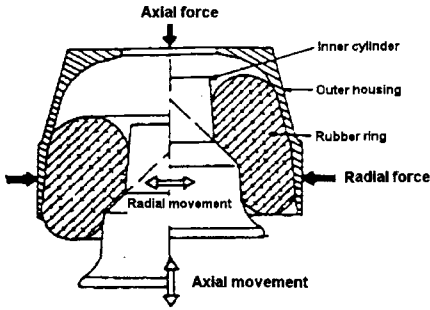


Fig. 3 Schematic of roll rubber spring

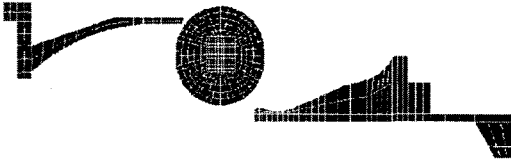


Fig. 4 Finite element model of roll rubber spring

3.2.2 Resilient Ring

Resilient ring은 여러층의 고무판과 금속판이 축대칭 형상으로 적층되어 있으므로 해석시간 절감 및 해석의 용이성을 위하여 2차원 축대칭 요소로 모델링 하였다.

고무 부위는 full-herrmann formulation quad 8 node 요소를 사용하였으며 접촉이 발생될 것으로 예상되어지는 곳에 contact body를 지정 하였다. Fig. 5에 resilient ring의 형상 및 유한요소 모델을 보여주고 있는데 요소는 1576개이며, 절점은 4899개이다.

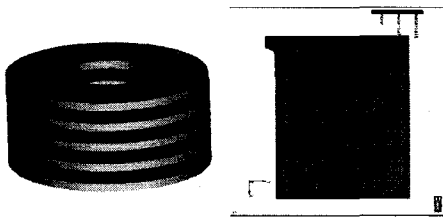


Fig. 5 Schematic and FE model of resilient ring

3.2.3 보조스프링

공기스프링의 보조스프링은 고무벨로우즈의 파손 등 사고 발생 시 안전장치의 역할을 수행 하며, 하중-변위 특성은 공기스프링 전체의 특성에도 영향을 끼친다. 보조 스프링은 고유의 하중-변위 특성곡선을 갖고 있으며 이러한 특성을 만족시켜야만 보다 정확한 공기 스프링의

특성을 얻을 수 있다. Fig. 6에 보조 스프링의 형상 및 유한요소 모델링을 보여주고 있는데 2차원 축대칭 요소를 이용하여 총 요소 개수는 596개이며 총 절점수는 656개로 모형화 하였다.

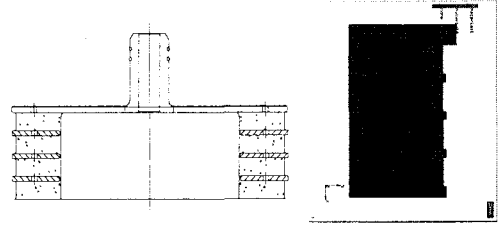


Fig. 6 Schematic and FE model of additional spring

3.3 유한요소 해석 결과

3.3.1 Roll Rubber Spring

Roll rubber spring에 대한 유한요소 해석의 주요 관점은 외측 하우징에 내경보다 큰 고무링을 압입할 경우 접촉문제의 수렴성과 하중이 작용할 때 고무부위의 변형 및 응력상태와 하중-변위 관계를 파악하여 정적 스프링 특성을 미리 예측하는 것이다. 강제요소를 이용하여 고무링을 수직 방향으로 일정량을 압축한 상태에서 내측 실린더를 수평방향으로 변위를 줄 경우에 대해 해석을 수행하였다.

고무 물성변화에 따른 스프링 특성을 알아보기 위하여 고무 물성 비선형 재료상수 data base를 이용하여 적절한 고무 물성을 선정하여 해석을 수행한 결과를 Fig. 7과 8에 나타내었다. 압입된 고무는 상당히 큰 변형을 나타냄을 알 수 있었고 이 때의 최대 변형율은 고무링의 안쪽부위에서 1.76 정도, 최대 등가응력은 외측 하우징에서 7.9 kg/mm^2 의 값으로 계산되었다. 그림에서 보는 바와 같이 고무와 금속과의 접촉은 별 문제없이 잘 수렴하여 상당히 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

또한, 고무 경도에 따라 스프링 특성의 차이는 심하게 나타남을 알 수 있었는데 경도가 높을수록 강성이 강한 스프링 특성을 나타내었다.

다음은 고무링을 수직방향으로 압축하는 깊이 에 따른 영향을 알아보기 위하여 외측 하우징의 내경인 8.55mm를 기준으로 하여 여러 경우로 압축한 경우에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 9에서와 같이 압축깊이가 깊을수록 수직 지그에 걸리는 힘은 증가한 반면 하중-변위 선도는 초기에는 유연하다가 나중에는 강해짐을

알 수 있었다.

그림에서 보는 바와 같이 roll rubber spring의 특성은 설계 요구 값과 해석결과가 거의 일치함을 알 수 있어 유한요소해석을 통해 스프링의 특성을 예측할 수 있었다.

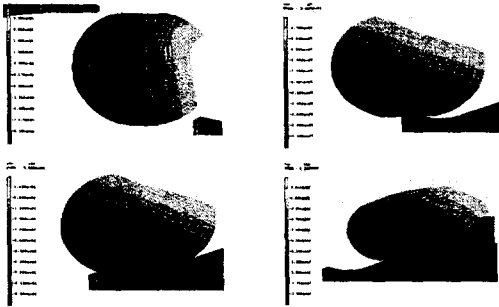


Fig. 7 Deformed shape of roll rubber spring

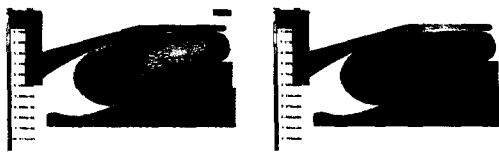


Fig. 8 Strain & stress distributions

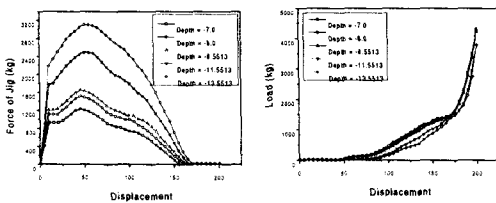


Fig. 9 Jig force & load-displacement curves

3.3.2 Resilient Ring

Resilient ring의 사용조건에 따라 x-축 방향으로 압축 변위를 10mm 작용시켜 해석을 수행하였다. 해석결과는 Fig. 10에서와 같이 압축 변위에 대한 변형 거동을 볼 수 있으며 하중-변위 관계선도에서 고무재료의 비선형 특성을 볼 수 있었다.

Fig. 11은 압축 변위 7.6mm 일때의 변형률 분포를 나타낸 것으로 외측 부위 보다 내측 부위에서 최대 주변형률이 발생되며 금속판과 고무의 접착부위에서 큰 변형률이 발생됨을 알 수 있었다.

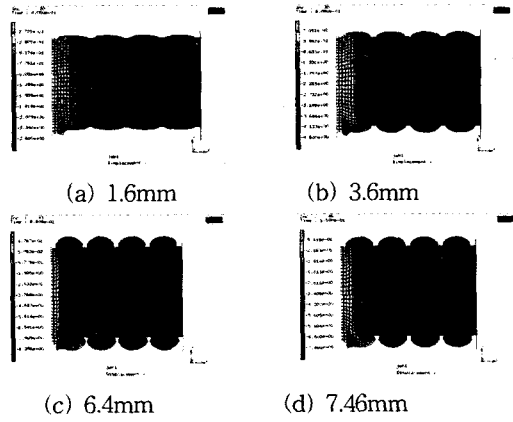


Fig. 10 Deformed shape of resilient ring

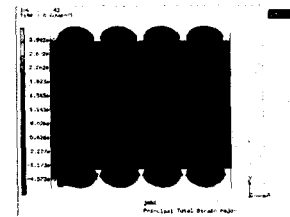


Fig. 11 Strain distribution of resilient ring

3.3.3 보조스프링 (Additional Spring)

Fig. 12는 보조스프링의 변형거동에 따르는 변형률 분포를 보여주고 있으며, 외경 부위와 내경 부위의 금속판과 고무의 접착 부위에서 최대 주 변형률 값을 나타내고 있다.

보조스프링이 수직 하중을 받으면 변형이 발생되어 공기스프링 상판과 하판 사이의 간격이 변하게 되며, 이로 인하여 지지하중의 변화를 초래하게 된다.

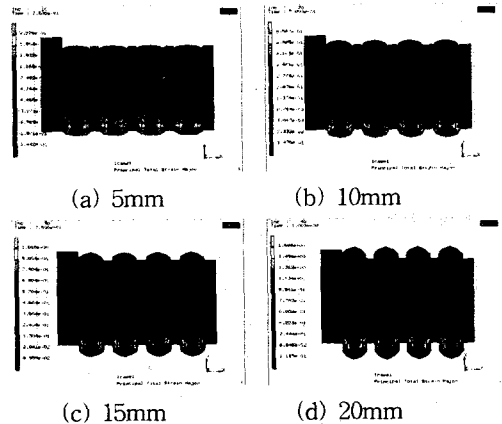
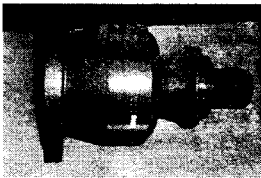


Fig. 12 Deformed shape of additional spring

4. 특성시험 및 평가

4.1 시제품 제작

철도차량 고무부품의 수직방향 강성 및 피로 시험 등의 특성시험을 수행하기 위하여 유한요소 해석결과를 토대로 하여 Fig. 13에서 보는 바와 같이 roll rubber spring, resilient ring, 보조스프링의 기본설계를 도출하여 시제품을 제작하였다. 제작하고자 하는 시제품들은 하중을 받는 동안에 비선형 특성이 실현되므로 정확한 스프링특성 및 제품의 신뢰성을 확보하기 위해서 정밀한 치수관리와 공차 유지 등 제작 공정과 고무 배합 및 제작에 세심한 주의가 요망되므로 철도차량용 방진 고무류를 제작하는 전문 업체를 선정하여 시제품을 제작하였다.



(a) Roll rubber spring



(b) Resilient ring



(c) Additional spring

Fig. 13 Rubber components for rail vehicle

4.2 특성시험 및 평가

제작된 시제품은 차량 부품에 조립되기 전에 필요한 성능을 평가하기 위하여 유압식 재료시험기와 구조물시험기를 이용하여 정적 및 피로 특성시험을 수행하였다.

4.2.1 Roll Rubber Spring

Roll rubber spring에 작용하는 하중은 주로 축 방향이 분담하며 축 방향의 스프링 특성이 승차감에 미치는 영향이 크기 때문에 본 시험에서는 축 방향 하중 1,780kg과 4,240kg 사이의 정적 스프링 특성을 기존품과 개발품에 대해 특성시험을 하였다.

Fig. 14에 수입품과 고무의 물성을 변화시킨 개발품 1과 개발품 2에 대한 스프링 특성선도를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 하중이 작용할 경우의 특성은 거의 유사하게 나타났으나 히스테리시스 곡선은 수입품보다 개발품이 더 크게 나타났다. 내구성을 평가하기 위하여 정적하중 3,500kg에 동적하중 ± 810 kg의 하중을 2.5Hz의 시험조건으로 100만회 피로시험을 수행하였다. Fig. 17에 보는 바와 같이 개발품의 피로시험 전과 100만회 시험 후의 스프링특성은 거의 변화가 없었으며, 시험 후의 고무 링의 피로 파손도 일어나지 않았음을 알 수 있었다.

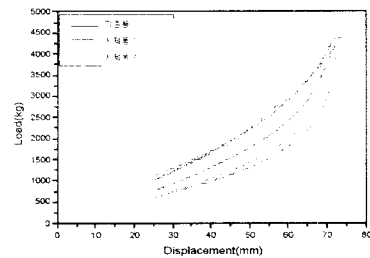


Fig. 14 Test result of roll rubber spring

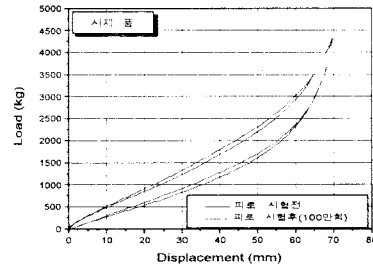


Fig. 15 Load-displacement curves

4.2.2 Resilient Ring

Resilient ring의 하중-변위 요구 특성은 Fig. 16의 1과 2 선도 사이의 값을 나타내어야 한다. 고무의 경도가 60도의 경우는 지나치게 강성이 크게 나타났으며, 경도 40도의 경우는 강성이 너무 낮게 나타났다. 유한요소해석 결과에 의하면 경도 45-50도의 경우가 요구 조건에 근접할 수 있을 것으로 예측되었으며, 시제품의 경도는 45가 적정함을 알 수 있었다. 특성시험은 10톤 용량의 유압식 재료시험기에서 실시하였으며, 데이터 처리 장치를 이용하여 하중과 변위 데이터를 저장한 후 선도를 작성하였다.

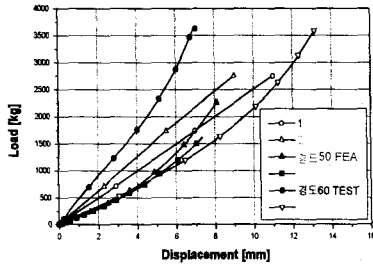


Fig. 16 Load-displacement curves of resilient ring

4.2.3 보조스프링

보조스프링의 하중-변위 시험결과는 비선형 해석 결과와 거의 유사한 변형 거동 양상을 나타내고 있다. Fig. 17은 보조스프링의 하중-변위 특성 곡선과 실제 제품을 시험해 본 결과를 비교한 것으로 Rubber A는 경도가 약 50도로서 실제 보조스프링에서 사용되어진 고무 재료이다. 해석에서 구한 하중-변위 선도는 실제 시험 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

한편, 공기스프링의 규격에 의하면 보조스프링의 변위는 다음식과 같이 규정되어 있다.

$$[\delta_1(10, 300\text{kg}) - \delta_2(500\text{kg})] = 8 \pm 1.2\text{mm} \quad (6)$$

요구 특성에 비해 Rubber A의 결과는 강성이 작게 나와 고무 경도가 약 55~60° 인 시제품(Rubber B)을 제작하여 추가 시험한 결과는 $[(\delta_1 = 7.71) - (\delta_2 = 0.50)] = 7.21\text{mm}$ 로서 요구하는 규격을 만족하였다.

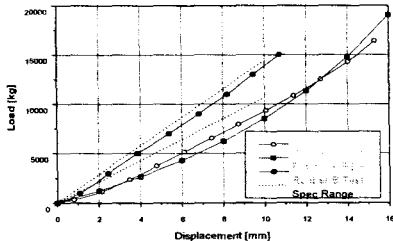


Fig. 17 Load-displacement curves of additional spring

5. 결론

본 연구에서는 철도차량의 현가장치에 사용되는 방진고무부품을 대상으로 비선형·대변형 유한요소해석을 이용하여 특성을 예측하였으며, 각 방진고무부품의 요구 특성에 맞는 재질을 선정하여 적절한 재질의 시제품을 제작하

여 특성시험을 실시하였으며, 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 고무의 비선형 재료상수는 유한요소 해석에 필수적인 데이터로서 이 값의 변화에 따라 해의 안정성 및 수렴성과 해석결과에도 큰 영향을 끼치게 되므로 정확한 재료상수의 결정이 매우 중요하다고 하겠다.
- (2) 인장, 압축, 전단시험을 통하여 고무물성의 비선형 재료상수 Data Base를 구축하였다.
- (3) 비선형 유한요소 해석을 통하여 철도차량용 방진고무부품의 특성을 예측하였으며 각 부품의 요구 특성에 맞는 고무 재질을 선정하여 시제품을 제작하였다.
- (4) 시제품에 대한 특성시험을 수행하여 해석으로 예측된 특성과 시험결과를 비교·분석하였다.

후기

본 논문은 국가지정연구실인 '고무역학연구실'에서 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

- [1] Gent, A. N., *Engineering with Rubber*, Hanser Pub., 1992.
- [2] N. Antoun, etc., "Applications of Major FEM Code to the Stress Analysis of Rubber Parts", Stuttgart, June, 1994.
- [3] Treloar, L. R. G. *The Physics of Rubber Elasticity*, 3rd ed., 1975
- [4] Brown R. P., *Physical Testing of Rubber*, 3rd ed., 1975.
- [5] "Development of Roll Rubber for Rail Car", December, 1996, Bridgestone, Japan.
- [6] Fried, R. Johnson "Nonlinear Computation of Axisymmetric Solid Rubber Deformation Computer Method in Applied Mechanics & Engineering, Vol. 67, pp. 241~253, 1988.
- [7] "MARC User's Manual", MARC Analysis Research Corporation.