

금속-고무 스프링의 유한요소 해석

Finite Element Analysis of Metal Bonded Rubber Spring

우 창수*

김 완두*

Woo, Chang-Su

Kim, Wan-Doo

ABSTRACT

Metal bonded rubber spring is used in primary suspension component of the high speed train. The aim of this study is to establish a finite element analysis technique for the metal bonded rubber spring. Some theoretical analyses were performed on the hyperelastic behavior in rubber material and test are carried out to acquire the constants in strain energy function for it. Also, finite element analysis were executed to evaluate the design parameter and behavior of deformation and stress distribution using by the commercial finite element code.

1. 서론

최근까지 대부분의 고무 부품의 설계는 재료의 특수한 성질로 인하여 시행 착오에 의한 경험적인 수법이나 실험에 의존하여 왔으나, 컴퓨터의 대형화 및 고속화에 따라 유한요소법을 이용한 비선형 해석을 통하여 고무 재료의 거동을 해석하는 것이 가능해짐에 따라 고무 부품의 설계에 체계적이고 분석적인 방법을 이용할 수 있게 되었다. 모든 기계 부품의 설계와 마찬가지로 고무 부품의 설계 시에도 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 부품의 특성을 미리 예측함으로써 시제품 제작 및 성능시험에 드는 막대한 시간과 경비를 줄일 수 있으며, 부품의 성능 향상에도 크게 기여할 수 있게 되었다^(1,2,3).

고무 부품에 대한 구조해석은 제품의 안전성 및 신뢰성을 확보하고 최적설계를 하기 위한 기술로 선진국에서는 이미 해석을 통하여 널리 활용하고 있는 실정이나, 현재 국내 관련 산업계에서는 이의 중요성을 인식하고는 있으나 아직까지 체계적인 설계 및 해석기술이 확립되어 있지 못한 실정이다.

* 한국기계연구원 신교통기술연구부

따라서, 본 연구에서는 복잡한 형상의 변형 및 응력상태를 자세히 알 수 있는 수치 해석 방법인 유한요소 해석법(finite element method)을 이용하여 철도차량의 현가 요소부품 중의 하나인 금속-고무 스프링에 대해 유한요소 해석을 수행하여 하중 또는 변위에 따른 형상 변화 및 정적 특성을 예측하여 설계 및 해석 능력을 확보하고자 한다^(4,5)

2. 금속-고무 스프링의 종류 및 특성

2.1 개요

금속-고무 스프링은 고무를 가황, 성형하여 이것을 금속 편에 접착시켜서 사용하므로 고무의 특성과악이 매우 중요하다 하겠다.

초탄성(hyper-elasticity) 거동을 나타내는 고무는 고도의 신장성, 탄성 복원 특성 및 진동 감쇄 특성으로 인하여 다양한 산업 분야에 폭넓게 사용되고 있는 중요한 공업재료 중 하나로 자동차를 비롯하여 대형기계 설비에 이르기까지 많은 기계 구조물에 진동 소음을 절연하는 주 기능 부품으로서 그림 1에서 보는 바와 같이 여러 가지 형태의 고무제품이 널리 사용되고 있다.

특히, 최근에는 철도차량의 주행 안정성과 안락한 승차감을 확보하기 위해 대차 및 차체에 완충력을 주어 저 진동, 저 소음화 등을 위하여 고무류 부품에 대한 고도의 해석 및 설계기술이 요구되고 있으며, 기술 선진국에서는 실제 이러한 설계기술을 통하여 고성능의 현가요소 부품을 개발하여 현가장치에 적용하고 있다^(6,7,8).

금속-고무 스프링에 관련된 국내기술은 기초 설계기술을 비롯한 소재기술, 제조 및 시험 평가의 모든 면에서 매우 취약한 상태로 외국 업체의 부품을 수입하여 조립 판매하거나 제품의 특성을 고려하지 않고 모방 제조를 시도하고 또는 기술을 도입하는 실정으로 현재의 우리 기술 수준으로는 새로운 열차에의 적용 및 기술향상은 기대하기 어려운 실정이다. 그러나 일본, 독일 등의 관련업체는 이미 설계 및 제조 기술이 개발되어 양산되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 금속-고무 스프링의 특성 및 설계변수를 파악하여 독자적인 설계능력을 확보하고자 한다.

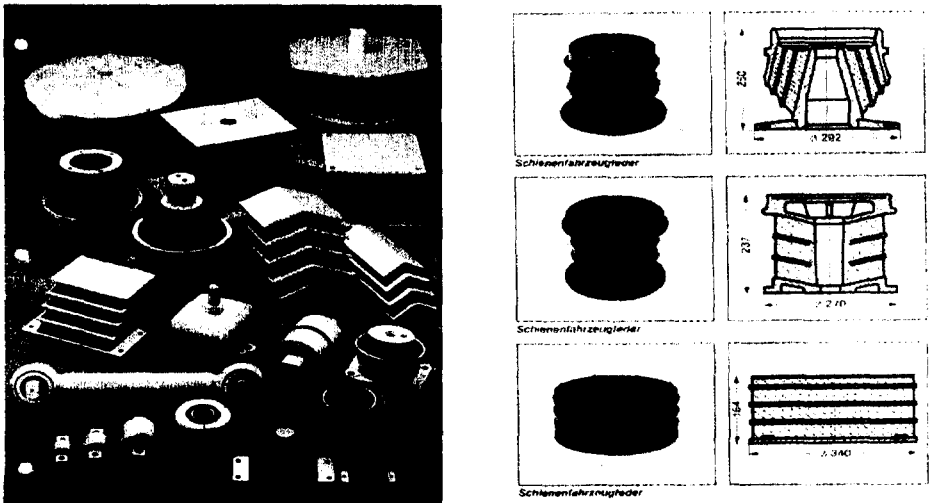


그림 1 금속-고무 스프링 형상

2.2 금속-고무 스프링의 종류 및 특성

철도차량의 현가장치에 사용되는 금속-고무 스프링은 사용 용도에 따라 평판고무, 원추형, 세브론 스프링으로 크게 나눌 수 있다.

평판 고무 스프링은 그림 2에서와 같이 주로 볼스터레스 대차의 2차 현가장치인 다이아프램형 공기 스프링에서 에어백과 직렬로 연결되어 공기 스프링 장치의 수평 및 상하방향의 가동량 부족을 보충하고 에어백 파손시 보조 스프링의 기능으로 사용되고 있다.

수평방향의 스프링 상수는 공기 스프링의 1/2인 15 kg/mm 정도이고, 상하방향은 영차 하중을 지지할 수 있도록 하기 위해 공기 스프링의 10배인 400kg/mm로 크게 하고 있다.

TGV-K 동력대차의 1차 현가장치에 사용되는 원추형 고무 스프링은 그림 3에서 보는 바와 같이 액슬 박스당 2 세트의 금속-고무 가이드 스프링으로 바퀴 세트를 전후 및 좌우방향으로 지지하며 대차 안정성에 요구되는 상수를 가지고 있다.

가이드 스프링의 특징은 수직, 횡, 길이 어느 방향으로도 축상과 대차 프레임 사이에 마찰이 일어나지 않으며 고무 자체의 히스테리시스 현상이 적절한 댐핑 효과를 발생하며 레일로부터 차체로 전달되는 소음의 절연 효과가 매우 크며 또한, 조립 방법에 따라서 스프링의 높이와 특성곡선을 변화시킬 수 있는 특징이 있다⁽⁹⁾.

또한, 축상 지지와 축 스프링을 겸한 세브론 스프링은 산형(山形) 단면의 고무와 금속판을 교차로 적층 접착한 블록을 축상과 대차 사이드 프레임 사이에 결합시킨 구조로서 축상을 지지함과 동시에 전단방향으로 스프링 작용을 하게끔 되어 있다.

세브론 고무 스프링의 특성은 그림 4와 같이 적층고무는 통상 액슬 박스에 대해 경사지게 취부되어 단순한 전단방향뿐만 아니라 고무의 압축방향에도 하중이 걸리도록 되어 있으며 또한, 간단한 구조와 긴 수명 및 저렴한 유지비용 등의 이점뿐 만 아니라 승차감을 향상시키는 역할을 담당하고 있다.

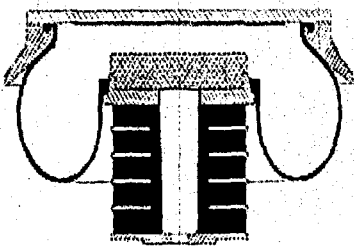


그림 2 평판 고무 스프링

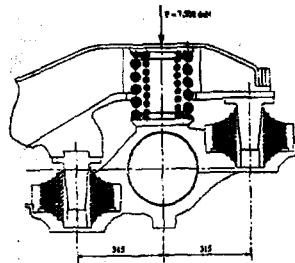


그림 3 원추형 고무 스프링

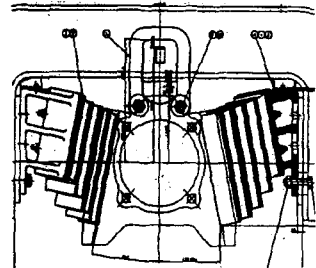


그림 4 세브론 고무 스프링

3. 고무의 특성시험

3.1 변형률 에너지함수

일반적으로 고무는 비선형 응력-변형률 관계, 기하학적 비선형성 및 대변형률을 나타낸다. 그러므로 고무부품의 비선형 해석시 재료를 초탄성체로 가정하며, 기계적 특성을 결정하기 위해서는 변형률 에너지 함수 W 를 정의하여야 한다. 이는 초기 배치(initial configuration)에서의 변형률 함수로써 재료의 단위 체적에 저장된 변형률 에너지의 변화율이 응력에 대한 일률과 같다는 개념을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad \rightarrow \quad \sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \epsilon_{ij}} \quad \rightarrow \quad W = \frac{1}{2} C_{ijkl} \epsilon_{ij} \epsilon_{kl} \quad (3.1)$$

여기서 S_{ij} 는 Second Piola-Kirchhoff 응력텐서, E_{ij} 는 Green-Lagrange 변형률 텐서

고무의 분자 사슬의 방향이 초기에는 임의적이므로 재료는 등방성이다. 그러나 재료가 신장됨에 따라 분자 사슬이 방향성을 갖게 되어 이방성이 증가하게 된다. 하지만 이방성의 증가가 변형 방향을 따르므로 재료는 변형 이력을 통해 등방성으로 간주된다. 따라서 결과적으로 변형률 에너지함수는 변형률 불변계수의 함수로 구성될 수 있다. 그러므로 등방성을 가정하면,

$$W = W(I_1, I_2, J) \quad (3.2)$$

여기서 변형률 불변계수를 주 신장률(principal stretch) λ 로 표시하면 다음과 같다.

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2, \quad J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad (3.3)$$

한편 대부분의 고무재료는 거의 비압축성이므로 체적계수(bulk modulus)는 전단계수(shear modulus)보다 상당히 크며 재료가 많이 구속되어 있지 않은 경우에는 비압축성의 가정은 일반적으로 양호한 결과를 보인다. 그러므로 비압축성을 가정하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{l_1 l_2 l_3}{l_1 l_2 l_3} = 1 \quad W = W(I_1, I_2) \quad (3.4)$$

그러므로 변형률 에너지 포텐셜의 변분 δU 는 다음과 같다.

$$\delta W = \frac{\partial W}{\partial I_1} \delta I_1 + \frac{\partial W}{\partial I_2} \delta I_2 \quad (3.5)$$

이 때 비압축성 고무의 등온 변형 해석에서 널리 쓰이는 변형률 에너지함수는 다항식 형태(polynomial form)와 오그덴 형태(ogden form)가 있는데 다음과 같이 나타낼 수 있다.

○ 다항식 형태 :
$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (3.6)$$

○ 오그덴 형태 :
$$W = \sum_{i=1}^N 2 \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (3.7)$$

여기서, C_{ij} , μ_i , α_i 는 시험결과로부터 결정되는 재료상수이다.

3.2 재료시험

앞에서 언급한 바와 같이 고무는 비선형 응력-변형률 관계, 기하학적 비선형성 및 대변형률을 나타내므로 기계적 특성을 결정하기 위해서는 변형률 에너지 함수를 정의하여야 하는데 이는 신장률 λ 로 정의되는 불변계수 I_1, I_2 와 계수 C_{ij}, a_i, μ_i 를 결정함으로써 알 수 있다⁽¹⁰⁾.

고무의 특성을 나타내는 재료상수를 구하기 위해서는 여러 가지 다른 하중 상태에서의 재료시험이 실시되어야 하는데 특히, 이 재료상수는 고무 부품의 유한요소 해석에 필수적인 데이터로서 이 값의 변화에 따라 해석 결과는 큰 차이를 나타내며 풀이의 안정성 및 수렴성에도 큰 영향을 끼치게 된다. 일반적으로 알려진 고무의 재료상수를 결정하기 위한 시험에는 그림 5에서와 같이 단축인장, 압축시험, 2축인장시험, 평면순수전단, 단순전단시험이 있다.

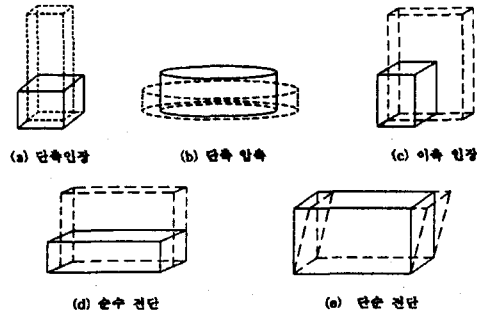


그림 5 각 재료시험의 변형모드

본 연구에서는 연구 대상 부품과 유사한 성질을 갖는 고무 시편을 제작하여 1축 인장, 압축시험과 단순전단시험을 그림 6과 같이 실시하여 시험결과로부터 응력-변형률 데이터를 이용하여 고무의 재료상수를 결정하였다. 그림 7은 각 시험 데이터를 3항 Ogden 함수로 피팅한 결과를 보여준다.

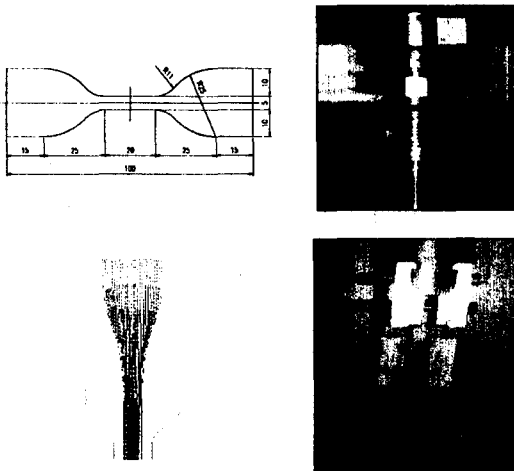


그림 6 재료시험 모습

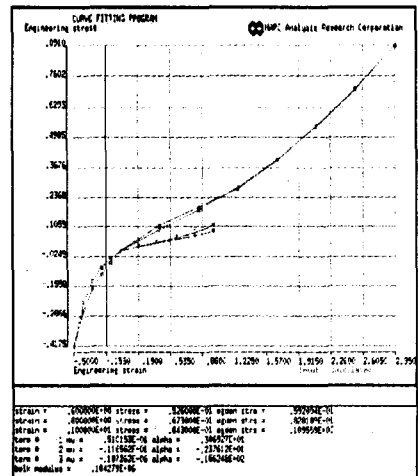


그림 7 3항 Ogden 함수로 피팅한 결과

4. 금속-고무 스프링의 유한요소 해석

4.1 평판 고무 스프링 해석

고무의 재료적 비선형과 해석의 수렴성, 요소 선정, 경계조건 등을 고려하여 그림 2와 같은 전동차 대차의 2차 현가장치에 사용되는 평판 고무 스프링에 대해 유한요소 해석을 수행하였다⁽¹¹⁾.

유한요소 모형은 원통형 금속판 사이에 고무가 적층되어 있는 축대칭 형상으로 2차원 축대칭으로 full-Herrmann formulation quad 8 요소로 모형화하였으며, 금속판의 재료 물성치로 탄성계수는 $21,000 \text{ kg/mm}^2$, 포아손 비는 0.3으로 하였으며, 고무의 물성치는 비 압축성으로 가정하여 고무 특성시험에서 얻어진 3항 Ogden 함수로 피팅한 상수인 $\mu_1=0.051, a_1=3.07, \mu_2=-0.0117, a_2=-2.38, \mu_3=-1.87E-06, a_3=-15.62, B=1.84E+06$ 를 적용하였다. 경계조건으로는 하단 부를 고정하고 상단 부에 수직하중(압축변위)이 작용하도록 하였다. 변위가 커짐에 따라 접촉이 발생할 것으로 예상되는 곡률 부위는 접촉체(contact body)로 지정하였으며 계산 결과의 신뢰성을 높이기 위해 요소의 종횡비는 거의 1:1로 분할하였다. 해석의 주요관점은 금속판과 고무와의 양끝 접촉면에서의 형상이 스프링 상수에 매우 밀접한 관계가 있었으므로 이 부분에서의 곡률 변화의 영향을 검토하였다. 따라서 고무와의 안쪽 접촉면은 그대로 두고 바깥쪽 접촉면의 곡률을 도면에 있는 $R=14$ 를 기준으로 하여 $R=\infty, R=20, R=11$ 인 네 가지 경우에 대해 해석을 수행하였다.

유한요소 해석결과로 그림 8에 네 가지 형상의 곡률에 압축방향으로 10mm의 변위를 주었을 때의 변형 모습을 나타내었다. 곡률 $R=\infty$ 인 경우의 내, 외측 곡률에 대한 수평방향의 변형은 심하게 일어나 금속판과 고무와의 접촉이 일어남을 알 수 있었고 $R=20, 14, 11$ 은 금속판과의 접촉은 조금 혹은 거의 일어나지 않은 상태를 보여주고 있다. 최대 등가응력과 최대 변형률이 발생하는 부위는 금속판과 고무와의 내, 외측 곡률 부위에서 고무가 심한 변형을 일으켜 서로 접촉되는 부위로 외측은 어느 정도의 곡률 영향으로 응력집중을 막을 수 있었으나, 내측 부위는 곡률이 무한대이기 때문에 외측보다 응력집중이 심하게 일어났다.

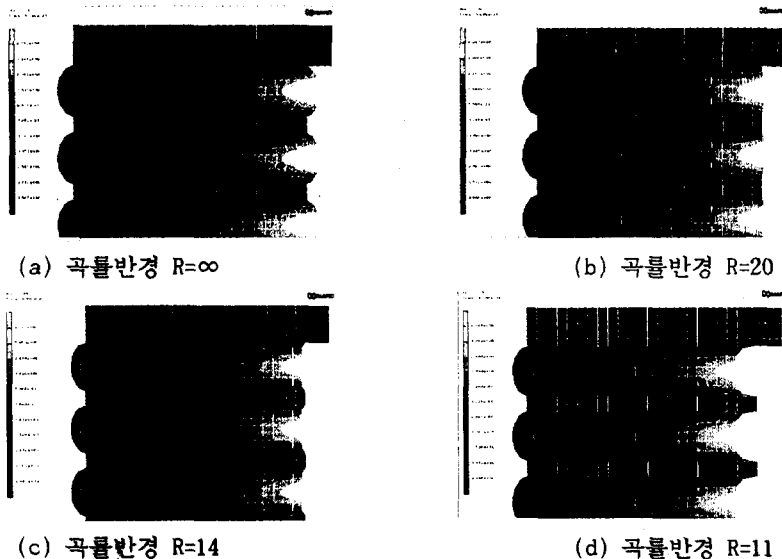


그림 8 압축방향 10mm 변위시 곡률변화에 따른 수평방향 변형 모습

그림 9는 곡률 변화에 따른 하중-변위 선도를 나타낸 것으로 곡률 변화에 따른 스프링 상수를 파악할 수 있었는데 곡률이 클수록 강성이 강하게 나타나 작용하중 및 사용조건 등에 따라 적절한 곡률을 선정하여야 할 것이다. 그림 10은 곡률 R=14인 경우에 대해서 내, 외측 곡률 부위에서의 Von. Mises 등가응력 및 Cauchy 등가응력값을 비교해 본 것으로 그림에서 보는 바와 같이 양쪽 다 같이 내측이 외측보다 큰 응력값이 발생함을 알 수 있어, 가능하다면 내측부위의 곡률도 어느 정도의 곡률을 주어 이 부위에서의 금속판과 고무와의 접촉을 줄일 수 있는 방향으로 설계 변경이 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한, 금속판과 고무와의 접촉 개시 하중을 예측할 수 있어 스프링 상수 결정 및 취약부위 예상 등 스프링 설계에 중요한 설계변수로서 활용할 수 있으리라 생각된다.

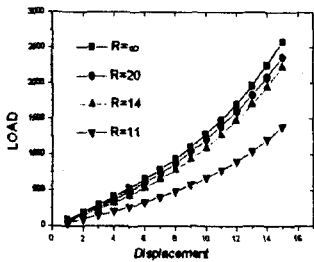


그림 9 하중-변위 선도

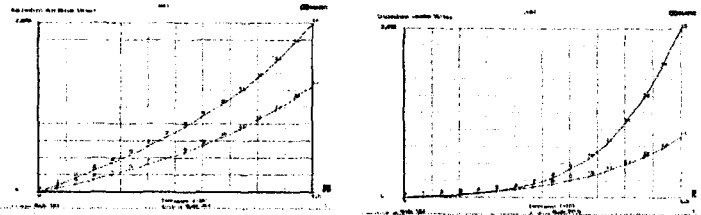


그림 10 내,외측 곡률부에서 등가응력 비교선도 (곡률 R=14)

4.2 원추형 고무 스프링 해석

평판 고무 스프링과 같은 방법으로 원추형 고무 스프링에 대해 수직하중을 받는 경우에 대해서 유한요소 해석을 수행하여 그림 11~13에 축방향으로 40mm 압축된 경우의 변형모습과 변형률 및 등가응력을 나타내었는데 금속판과 고무와의 접촉은 발생하지 않았으며 최대변형 및 응력은 마지막 고무층의 아래부위에서 발생하였다. 그림 14~16의 하중-변위 선도로 스프링 상수와 각 고무 층에 작용하는 응력 및 변형률 분포를 통하여 스프링 특성을 파악할 수 있었다.

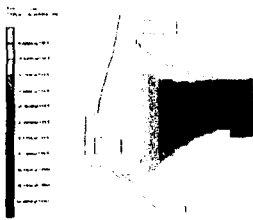


그림 11 40mm 압축시 변형모습

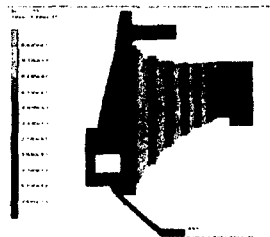


그림 12 변형률 분포

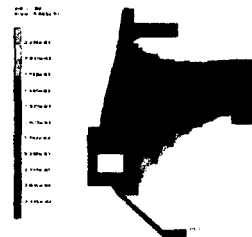


그림 13 Cauchy 응력 분포

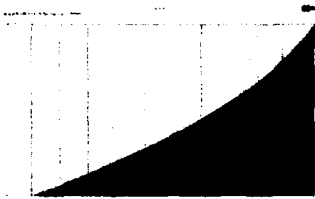


그림 14 하중-변위 선도

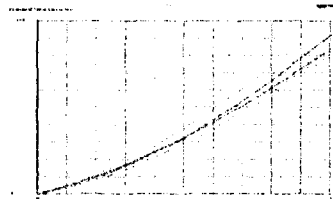


그림 15 변형률 선도

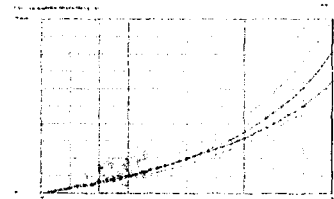


그림 16 Cauchy 응력 선도

5. 결 론

철도차량시스템의 현가장치에 사용되는 금속-고무 스프링은 고속주행시 안정성 및 승차감에 중요한 역할을 담당하며 차량과 승객의 안전운행에 직결되므로 절대의 내구성과 신뢰성을 만족시키는 적절한 설계 및 해석 등에 관한 기술은 매우 중요하다 하겠다.

본 연구에서는 금속과 고무로 여러 층 적층되어 있는 평판 및 원추형 고무 스프링에 대하여 해석 모델링과 요소 및 경계조건 설정 등을 통하여 여러 형상에 대한 하중-변위 선도, 변형 및 응력상태 변화 등 스프링 특성을 파악할 수 있는 유한요소 해석 기법을 정립하였다.

또한, 고무의 물성치가 해석결과에 상당한 영향을 미침을 알 수 있었으므로 정확한 고무의 물성치를 얻기 위한 고무 재료시험의 중요성을 인식하게 되었다.

참 고 문 헌

1. N. Antoun, E. Jankvoich, T. Estebenet, "Applications of Major FEM Code to the Stress Analysis of Rubber Parts", Stuttgart, 28-30 June, 1994.
2. T. E. Shoup, G. R. Fegan, "Computer Assisted Design of Rubber Shear Springs", Computers Engineering, ASME, 1993.
3. H.Y. Kim, C.S. Woo, W.D. Kim, " Computer Simulation of the behavior of CV Joint Boot", IPC-8 Proceeding, Vol.2. pp. 353~358, 1995.
4. Fried, A. R. Johnson "Nonlinear Computation of Axisymmetric Solid Rubber Deformation", Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 67, pp. 241~253, 1988
5. H.Y. Kim, "Material Characterization and Stress Analysis for Rubber by Finite Element Method", Univ. of Akron, pp. 1~147, 1993.
6. "Schwingmetal Spring for Rail Vehicles and Industrial Plant", ContiTech Specialist in Rubber Technology.
7. "The Smoothest Ride on Rails.. Conti AirSpring and Air Suspension Systems for Rail Vehicles", ContiTech Specialist in Rubber Technology.
8. "Springs and Components for Rail Vehicles", Metalastik, Vibration Control Systems,
9. "Technical Specification-Guide Spring", TGV-K 현가장치 관련자료, ST 15-223-920
10. L.P. Smith, "The Language of Rubber - Introduction to the specification and testing of elastomers", Burrweworth-Heinemann, 1993
11. Fried, A. R. Johnson "Nonlinear Computation of Axisymmetric Solid Rubber Deformation", Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 67, pp. 241~253, 1988

후기

본 연구는 선도기술개발(G7과제)사업의 일환으로 수행된 연구 결과의 일부임을 밝히며, 연구에 협조해 주신 대원강업(주)에도 감사의 뜻을 포함합니다.