

철도차량용 액슬 스프링의 유한요소 해석

Finite Element Analysis of the Axle Spring for Railway Vehicles

우 창수*
Woo, Chang-Su

권 재도**
Kwon, Jae-Do

ABSTRACT

The axle spring is used in primary suspension component of railway vehicles. The most important factor of axle spring is to have adequate spring constant for comfortable feeling of ride. The non-linear properties of rubber which were important parameter to evaluate of rubber components, were determined by the characteristic test. The finite element analysis of the axle spring are executed to predict the behavior of deformation and stiffness by using commercial FEA code.

1. 서론

철도차량시스템에 있어서 현가장치는 차량의 하중을 정적 및 동적으로 지지하고 바퀴로부터의 견인력과 제동력을 전달하며 차량부품에 대한 손상을 방지하는 등 주행시 안정성 및 승차감 향상에 중요한 역할을 담당하며 차량과 승객의 안전운행에 직결되므로 절대의 신뢰성과 승객이 편안하다고 느끼는 진동 범위 내로 현가장치를 설계하여야 한다⁽¹⁾.

최근에는 진동·소음을 방지하고 승차감을 향상시키기 위하여 고무재료가 지닌 특수한 성질인 우수한 신장성과 탄성 복원 능력 및 진동 감쇄 특성으로 인하여 현가요소 부품에 고무제품이 널리 사용되고 있으나, 고무제품에 대한 설계 능력은 고무재료의 거동이 널리 알려진 금속재료의 거동과는 상이하기 때문에 시행 착오에 의한 경험적인 수법이나 실험에 의존하여 아직까지는 초보적인 단계라 할 수 있다. 그러나, 최근에는 유한요소법을 이용한 비선형 해석을 통하여 고무재료의 거동을 해석하는 것이 가능해짐에 따라 고무제품의 설계에 체계적이고 분석적인 방법을 이용할 수 있게 되었다^(2,3).

* 한국기계연구원 구조시스템연구부

** 영남대학교 기계공학부

따라서, 본 연구에서는 철도차량의 1차 현가장치에 사용되는 액슬 스프링에 대해 전산 시뮬레이션을 통하여 하중 또는 변위에 따른 형상변화와 정적 스프링 특성을 미리 예측하고 평가하여 시제품 제작 및 성능시험에 드는 막대한 시간과 경비를 줄이고 또한 부품의 성능향상에 기여하고자 한다.

2. 액슬 스프링의 개념설계

2.1 개요

철도차량에 있어서 액슬 박스(axle box) 지지장치는 대차의 고속주행 특성을 좌우하는 중요한 장치로서 액슬 박스의 전후, 좌우방향의 운동을 억제하면서 상하방향은 스프링으로 완충작용을 하게 하여 진동 및 소음 전달을 최소화하고 차량이 고속으로 안전하게 주행할 수 있도록 하는 역할을 담당하고 있다.

액슬 박스 지지장치의 중요한 부품인 액슬 스프링의 설계에 있어서 가장 중요한 요소는 안락한 승차감을 만족하는 적절한 스프링 상수와 설치 및 유지보수가 용이하고 크립(creep)을 줄이는 것이다 할 수 있다. 액슬 스프링으로 초기에는 산형(山形) 단면의 고무와 강판을 교차로 적층 접착한 세브론(chevron) 스프링을 적용하였으나 위의 조건들을 만족하지 않는 이유로 인해 최근에는 그림 1에서 보는 바와 같이 금속과 고무가 접착되지 않은 원추형(conical unbonded rubber spring)으로 보수 유지시 고무만 교환함으로 보수비가 절감되며 전후, 좌우 강성이 부드러워 곡선 통과 성능이 우수하며 내, 외측 커버 사이의 고무부분의 회전과 또한 특별히 배열된 내부 접촉면으로 인해 비선형 특성이 실현되기 때문에 수직하중 조건하에서 축방향으로 유연한 스프링 상수를 얻을 수 있고 크립 특성이 우수한 새로운 타입의 롤 고무 스프링(roll rubber spring)이 최근에 개발되어 사용되고 있다^(4,5). 현재, 국내에서도 서울 지하철 4호선, 7호선, 8호선과 대구 지하철의 1차 현가장치로 사용되고 있으나 전량 일본에서 수입하고 있으므로 해석기술을 통한 국산화 개발이 시급한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 롤 고무 스프링의 형상설계 및 해석기술을 통하여 스프링의 특성 및 설계변수를 미리 파악하여 독자적인 설계능력을 확보하고자 한다.

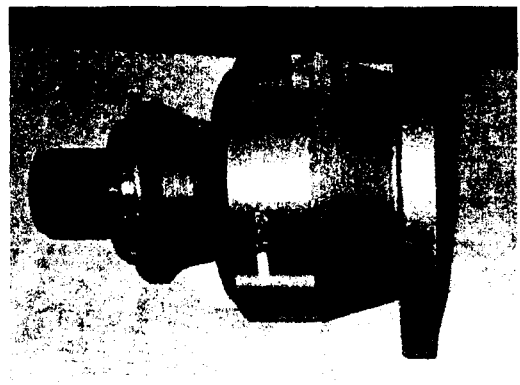
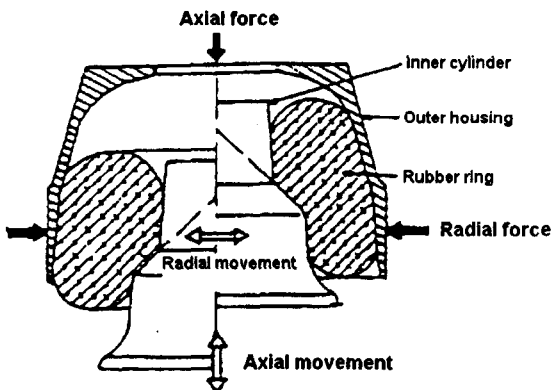


그림 1 철도차량용 액슬 스프링

2.2 롤 고무 스프링의 기본 형상설계

롤 고무 스프링은 액슬 박스당 2세트로 구성되어 있으며 그림 2에서 보는 바와 같이 외측 하우징과 내측 실린더 및 고무 링으로 크게 나눌 수 있다.

내, 외측 면에는 고무의 미끄럼 방지와 비선형 특성을 나타내기 위하여 R0.7의 홈을 가공하였으며 고무 링의 형태는 타원형으로 이루어져 있다. 외측 하우징의 내경보다 고무 링의 외경이 크기 때문에 내측 실린더와 치구를 이용하여 억지 끼움으로 조립되어야 하므로 고무의 형상 및 재질이 스프링 강성에 대단히 중요한 영향을 끼치게 되므로 롤 고무 스프링의 설계에 중요한 변수라 할 수 있겠다.

고무의 재질은 천연고무로 경도는 68정도이며 금속 편은 주강으로 이루어져 총 무게는 27.4 kg이다. 하중조건으로 수직하중 4,291 kg으로부터 하중을 제거하여 1,326 kg일 때 높이는 225mm로 이 때의 변위는 $35 \pm 3\text{mm}$ 이다. 또한, 설치나 작동동안에 고무부분은 외측 하우징에 의해 보호되므로 물, 눈, 먼지 등의 외부 환경에서도 사용이 가능하다

롤 고무 스프링의 외형 및 기본치수를 그림 3에 나타내었다.



(a) 내측 실린더

(b) 외측 하우징

(c) 고무 링

그림 2 롤 고무 스프링의 부품

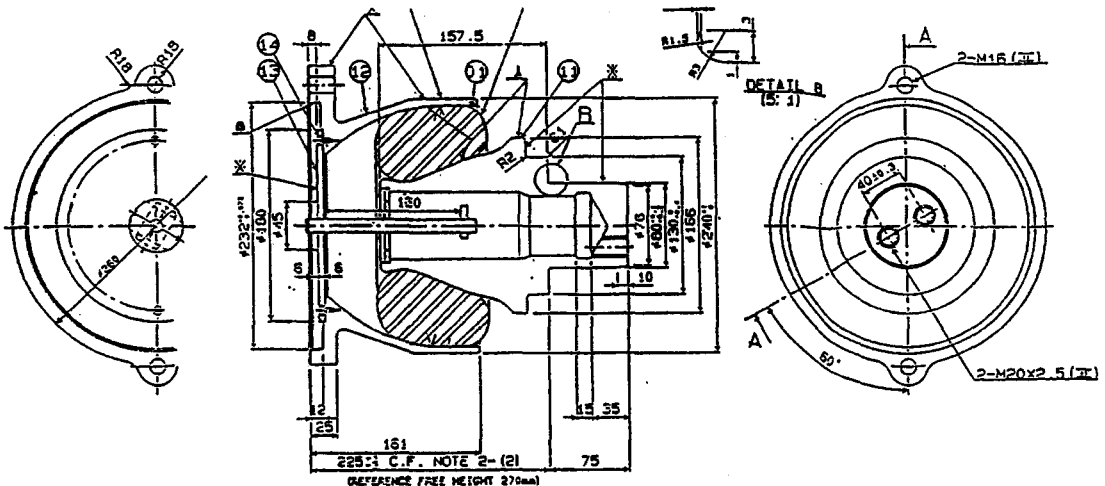


그림 3 롤 고무 스프링의 기본설계

3. 롤 고무 스프링의 특성 해석

3.1 고무재료시험

롤 고무 스프링은 고무를 압입하여 사용하므로 고무의 특성과악이 매우 중요하다 하겠다. 고무는 비선형 응력-변형을 관계를 나타내므로 기계적 특성을 결정하기 위해서는 변형을 에너지함수를 정의해야 하는데 이는 신장을 λ 로 정의되는 불변계수 I_1, I_2 와 계수 c_{ij}, a_i, μ_i 를 결정하므로써 알 수 있다⁽⁶⁾. 고무의 특성을 나타내는 재료상수를 구하기 위해서는 여러 가지 다른 하중 상태에서의 재료시험이 실시되어야 하는데 본 연구에서는 고무 물성변화에 따른 스프링 특성을 파악하기 위하여 대상부품과 유사한 HD 66과 60, 50의 고무경도를 갖는 고무 시편을 제작하여 단축 인장·압축시험과 전단시험을 수행하여 3항 Ogden 함수로 고무의 재료상수를 결정하였다.

이 재료상수는 고무부품의 유한요소 해석에 필수적인 데이터로서 이 값의 변화에 따라 해의 안정성 및 수렴성과 해석결과에도 큰 영향을 끼치게 되므로 재료상수의 결정이 매우 중요한 설계변수 중의 하나라 할 수 있다.

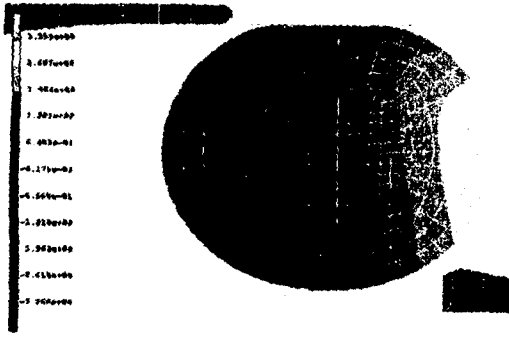
3.2 유한요소 해석

유한요소 모형은 기하학적 형상 및 하중이 축대칭이기 때문에 계산의 편의를 위해 2차원 축대칭 요소를 이용하여 full-herrmann formulation quad 요소로 모형화하였다⁽⁷⁾. 고무부분은 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.

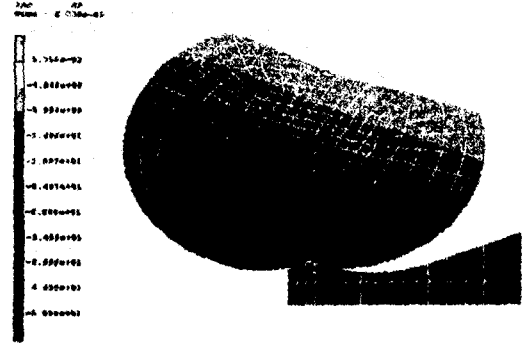
또한, 외측 하우징의 안쪽 면과 내측 실린더의 바깥쪽의 홈 가공은 마찰계수를 변화하여 마찰효과를 나타내었다. 금속의 재료 물성치로 탄성계수는 $21,000 \text{ kg/mm}^2$, 포아슨 비는 0.3으로 하였으며 고무의 물성치는 비 압축성으로 가정하여 고무 특성시험에서 얻어진 3항 Ogden 함수로 구해진 재료상수값들을 적용하였다.

롤 고무 스프링에 대한 유한요소 해석의 주요 관점은 외측 하우징의 내경보다 큰 고무 링을 압입할 경우 접촉문제의 수렴성과 하중이 작용할 때 고무부위의 변형 및 응력상태와 하중-변위 관계를 파악하여 정적 스프링 특성을 미리 예측하는 것으로, 강체요소를 이용하여 고무 링을 수직 방향으로 일정량을 압축한 상태에서 내측 실린더를 수평방향으로 변위를 줄 경우에 대해 해석을 수행하였다. 유한요소 해석은 비선형 및 접촉문제 해석이 용이한 상용 유한요소 코드인 MARC ver k7.1을 이용하였으며 HP9000 C180 기종에서 수행하였다⁽⁸⁾.

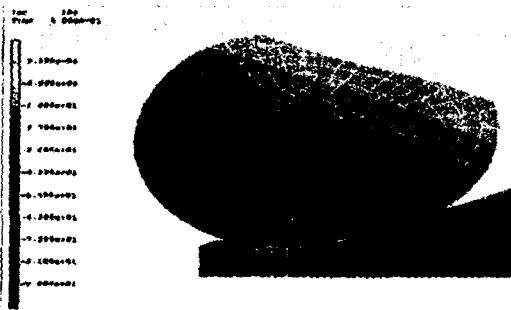
먼저 고무 물성변화에 따른 스프링 특성을 알아보기 위하여 고무 경도 50, 60, 66인 경우에 대해서 해석을 수행한 결과로 그림 4~5에서 보는 바와 같이 경도 66인 고무 링이 외측 하우징의 내경까지인 -8.5513mm 압축 되었을 때의 고무의 변형모습과 내측 실린더에 최대하중이 작용하는 경우의 변형모습을 나타내었다. 압입된 고무는 상당히 큰 변형을 나타냄을 알 수 있었고 이 때의 최대 변형율은 고무 링의 안쪽부위에서 1.76 정도, 최대 등가응력은 외측 하우징에서 7.9 kg/mm^2 의 값으로 계산되었다. 그림에서 보는 바와 같이 고무와 금속과의 접촉은 별 문제없이 잘 수렴하여 상당히 좋은 결과를 얻을 수 있었다.



(a) 수직방향으로 8.5513mm 압축한 모습



(b) 수평방향으로 50mm 압입한 모습



(c) 수평방향으로 90mm 압입한 모습



(d) 수평방향으로 190mm 압입한 모습

그림 4 경도 66인 고무 링의 압입 모습



(a) 변형을 분포



(b) 등가응력 분포

그림 5 고무 링 경도가 66인 경우의 변형을 및 응력상태

그림 6에는 고무 링을 압축하고 지지하는데 필요한 지그(jig)의 하중이력과 스프링 특성선도를 나타내었는데 그림에서와 같이 경도가 낮을수록 고무를 압축하는 치구력은 작아짐을 알 수 있었으며, 수직방향으로 -8.5513mm 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 경도에 따라 스프링 특성의 차이가 심하게 나타남을 알 수 있었는데 경도가 높을수록 강성이 강한 스프링 특

성을 나타내었다. 따라서 정확한 스프링의 특성을 파악하기 위해서는 고무 물성을 정확히 정의하는 것이 매우 중요한 사항이라 할 수 있겠다.

다음은 내측 실린더와 외측 하우징의 안쪽면에 홈이 파져 있기 때문에 이를 고려하기 위하여 고무 경도 66인 물성에 마찰계수 0.3~0.6으로 변화하여 해석을 수행한 결과, 그림 7에서 보는 바와 같이 치구력 및 스프링 특성의 변화는 거의 나타나지 않았다.

다음은 고무링을 수직방향으로 압축하는 깊이에 따른 영향을 알아보기 위하여 외측 하우징의 내경인 -8.5513mm를 기준으로 하여 여러 경우로 압축한 경우에 대해 해석을 수행한 결과, 그림 8에서와 같이 압축깊이가 깊을수록 수직 지그에 걸리는 힘은 증가한 반면 하중-변위 선도는 초기에는 유연하다가 나중에는 강해짐을 알 수 있었다.

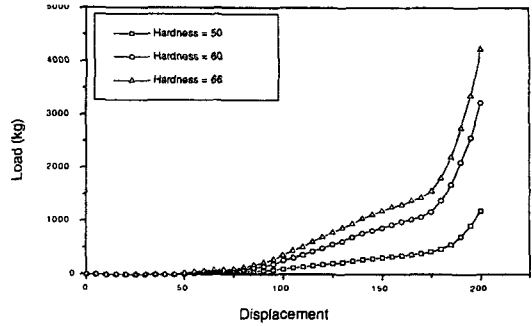
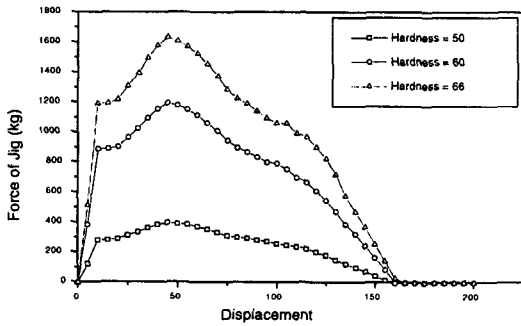


그림 6 고무물성 변화에 따른 치구력 스프링 특성 선도

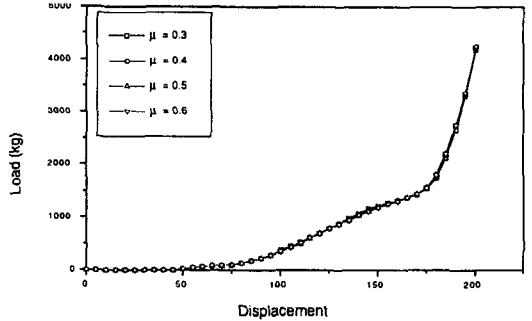
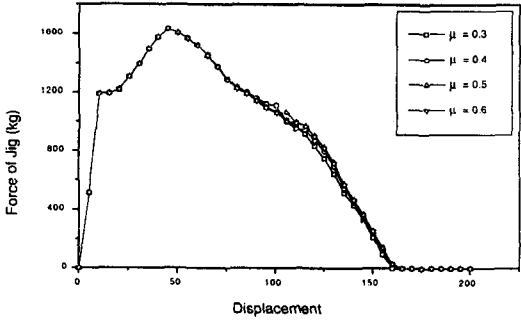


그림 7 마찰계수 변화에 따른 치구력 스프링 특성 선도

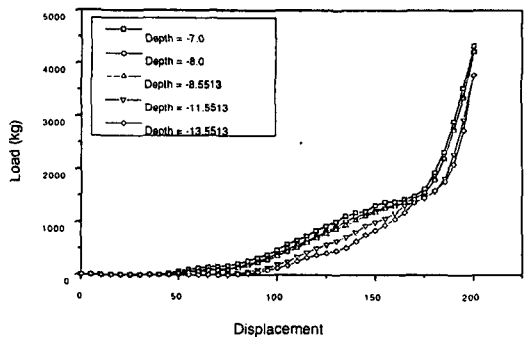
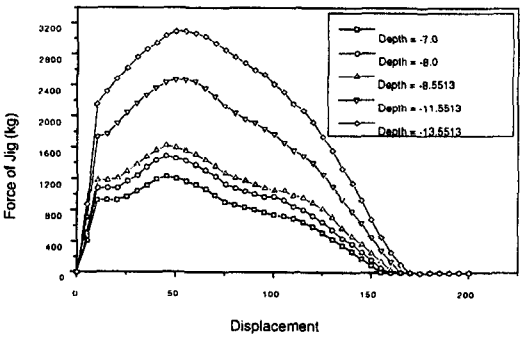
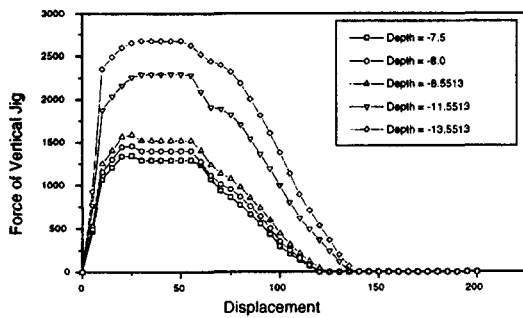


그림 8 고무 링의 압축깊이 변화에 따른 치구력 스프링 특성 선도

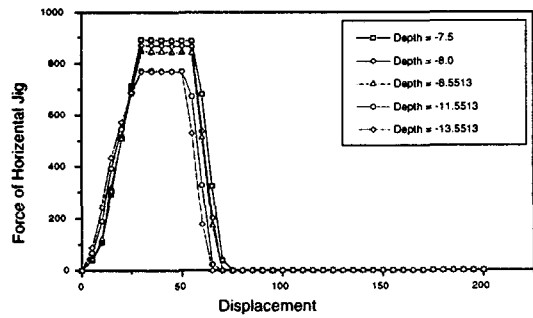
다음은 고무 링을 압축하는 다른 방법으로 먼저 수직방향으로 압축한 다음 수평방향으로 또 다른 지그를 이용하여 20mm 압축한 경우에 대해서 해석을 수행한 결과를 표 1과 그림 9에 나타내었는데 수직방향의 치구력은 압축깊이가 깊을수록 커지고 수평방향은 반대로 작음을 알 수 있었으며 스프링 특성은 초기 압입시에는 압축깊이에 따라 변화가 있었으나 어느 정도 압입된 상태에서는 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 또한, 수직방향의 지그만을 이용하는 압축하는 경우보다 수직, 수평방향의 지그를 이용하여 고무 링을 압축하는 경우의 스프링 특성이 유연하게 나타남을 알 수 있었다. 이상으로 고무물성 및 마찰계수, 압축깊이 변화에 따른 유한요소 해석 결과를 통하여 고무 경도와 압축깊이 및 수직, 수평방향의 지그 이용에 따라 변형률 및 응력과 치구력이 달라짐을 알 수 있어 스프링 특성 및 취약부위 예상 등 스프링 설계에 중요한 설계변수로서 활용할 수 있으리라 생각된다.

표 1 압축깊이 변화에 따른 해석결과

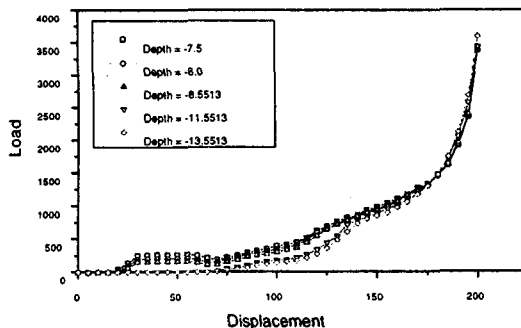
	A	B	C	D	E
수직지그 압축량	-7.5mm	-8.0mm	-8.5513mm	-11.5513mm	-13.5513mm
수평지그 압축량	-20mm	-20mm	-20mm	-20mm	-20mm
최대 변형률	1.905	1.909	1.914	1.918	1.951
최대 등가응력	5.072	4.894	4.743	4.179	4.081
수직방향 치구력	1342kg	1472kg	1642kg	2311kg	2680kg
수평방향 치구력	910kg	874kg	853kg	772kg	768kg
최대하중	3360kg	3393kg	3411kg	3449kg	3608kg



(a) 수직방향 치구력



(b) 수평방향 치구력



(c) 스프링 특성 선도

그림 9 고무 링의 수직 및 수평방향 압축깊이 변화에 따른 치구력 스프링 특성 선도

5. 결 론

철도차량의 1차 현가장치에 사용되는 액슬 스프링의 특성해석을 통하여 다음과 같은 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 중요하다 할 수 있다.
- (2) 고무 경도에 따라 스프링 특성의 차이가 심하게 나타남을 알 수 있었는데 경도가 높을수록 치구력에 걸리는 힘이 커졌으며 강성이 강한 스프링 특성을 나타내었다.
- (3) 고무 링의 압축깊이 및 수직, 수평방향의 지그 이용에 따라 변형을 및 응력과 치구력을 파악하여 스프링 특성 및 취약부위를 예측할 수 있었다.
- (4) 고무 경도 및 고무 링을 압입하는 방법이 스프링 특성에 큰 영향을 미치는 설계인자임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 송 달호 외, "고속전철 시스템의 속도향상에 미치는 기계적 요인에 관한 연구", 한국기계연구원 보고서, UCN 395-1573.C, 1991.
2. N. Antoun, E. Jankvoich, T. Estebenet, "Applications of Major FEM Code to the Stress Analysis of Rubber Parts", Stuttgart, 28-30 June, 1994.
3. E. F. Gobel, Dr. Ing. "Rubber Spring Design", London Newnes-Butterworth.
4. "Technical Data for Seoul Subway Line No. 6/7/8", December, 1996, Bridgestone, Japan.
5. "Development of Roll Rubber for Rail Car", December, 1996, Bridgestone, Japan.
6. James, A. G., Green, A., and Simpson, G. M., 1975, "Strain energy function of rubber. I. Characterization of gum vulcanizates", J. Appl. Poly. Sci., Vol. 19, pp.2033-2058.
7. Fried, A. R. Johnson "Nonlinear Computation of Axisymmetric Solid Rubber Deformation", Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 67, pp. 241~253, 1988
8. "MRAC User's Manual", MARC Analysis Research Corporation.

후기

본 연구는 중소기업수탁사업의 일환으로 수행된 연구결과에 일부임을 밝히며, 연구에 협조해 주신 동명특수고무 관계자에게 감사의 뜻을 표합니다.