

철도차량용 세브론 스프링의 강성 예측 및 평가

Prediction and Evaluation of Stiffness of Chevron Spring for Rail Vehicle

김완두¹, 김완수², 우창수³, 정승일⁴, 김석원⁴, 김영구⁴

Wan-Doo Kim, Wan-Soo Kim, Chang-Soo Woo, Seung-Il Jung, Seok-Won Kim, Young-Koo Kim

Keywords : Chevron Spring(세브론 스프링), Rubber(고무), Stiffness(강성), Rail Vehicle(철도차량)
Strain Energy Function(변형률에너지함수), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

A chevron rubber spring is used in primary suspension system for rail vehicle. The chevron spring support the load carried and reduces vibration and noise in operation of rail vehicle. The computer simulation using the nonlinear finite element analysis program MARC executed to predict and evaluate the load capacity and stiffness for the chevron spring. The appropriate shape and the material properties are proposed to adjust the required characteristics of chevron spring in the three modes of flexibility. Also, several samples of chevron spring are manufactured and experimented. It is shown that the predicted values agree well the results obtained from experiment.

1. 서론

철도 차량의 1차 현가 장치 부품 중의 하나인 세브론 스프링(chevron spring)은 차량의 운동 특성과 밀접한 관계를 가지고 있으며 차량의 주행 안정성 및 승차감에 중요한 역할을 한다. 특히, 차량 운행에 따른 제반 정·동적 하중을 완화시켜 차량 부품 및 궤도의 손상을 방지하고 승객과 화물에 전해지는 진동·소음을 최소화시켜 주는 역할을 수행한다[1].

지금까지 고무 스프링의 설계 시 경험을 바탕으로 한 시행 착오법을 통해 설계를 하였는데 이러한 방법은 제작 및 설계 시에 많은 시간과 경비가 소요된다. 하지만, 최근 컴퓨터의 대형화와 관련 해석 소프트웨어

어의 발전으로 고무부품의 설계에도 전산해석을 통한 CAE 기술이 널리 이용되고 있으며, 전산해석을 통하여 재질 및 형상의 선정시 시간과 비용을 절감할 수 있게 되었으며, 보다 정확한 해석을 통하여 고무 스프링에 요구되는 특성에 맞는 주요 설계 변수의 영향을 파악할 수 있게 되었다[2,3].

본 논문에서는 비선형 유한요소해석 프로그램인 MARC[4]를 이용하여 3축 방향 하중을 받는 철도차량용 세브론 스프링의 주요 설계변수 변화에 따른 강성을 예측 및 분석하였고, 시제품을 제작한 후 시험을 통하여 이를 검증하였다.

2. 설계변수 및 유한요소 모델링

2.1 세브론 스프링의 설계변수

철도차량의 1차 현가 장치로 쓰이는 세브론 스프링

¹ 정회원, 한국기계연구원 구조시스템연구부, 책임연구원

² 비회원, 한국기계연구원 구조시스템연구부, 연구원

³ 정회원, 한국기계연구원 구조시스템연구부, 선임연구원

⁴ 정회원, 유원산업(주)

은 '갈매기모양(chevron)'의 금속판재와 고무가 적층되어 있는 구조로 한 개의 바퀴에 두 개의 스프링이 장착되어, 지면으로부터 전달되는 진동을 1차적으로 흡수하는 역할을 한다. 세브론 스프링은 정지 또는 운행 시 차량 중량에 의한 수직 방향 하중을 지지하며, 가속 및 감속 시에는 길이 방향 하중(longitudinal load)을, 곡선로를 주행 시에는 횡 방향 하중(lateral load)을 추가적으로 받게 된다. Fig. 1은 세브론 스프링이 철도차량의 바퀴 및 대차에 장착된 모습이다. 세브론 스프링의 특성에 영향을 주는 주요 설계변수는 적층 고무의 물성, 고무의 두께, 중앙 여유공간의 유무 및 세브론 각 등이며 유한요소 해석을 통하여 이들 설계변수의 영향을 요구 특성과 비교·검토하였다.

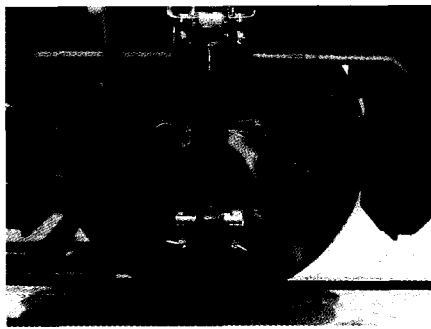


Fig. 1 Chevron Springs

2.2 세브론 스프링의 모델링

세브론 스프링의 유한요소모델은 세 방향의 해석을 각각 수행해야 하므로 3차원 유한요소 모델링을 이용하였으며, 요소(element) 수는 8114 개, 절점(node) 수는 10682 개이다. 고무는 full hermann formulation 8 요소를 사용하였다. Fig. 2는 세브론 스프링의 3차원 유한요소 모델링 형상이다.

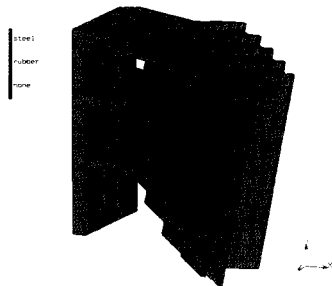


Fig. 2 3-D Model of Chevron Spring

사용된 고무는 가황 처리된 천연고무로 시편을 제작하여 인장, 압축, 전단 시험으로 응력-변형률 곡선을 구하였다. 고무 재료는 비압축성으로 가정하였으며 비선형 커브피팅을 통하여 얻어진 오그덴(Ogden) 3항 모델인 식 (1)을 이용하여 재료 상수 값을 구하였다[5].

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

Table 1은 경도 44, 50, 60의 고무 재료상수를 오그덴 3항 모델로 표현한 것이다.

Table 1 Ogden Constants of Rubber

Hardness 44		Hardness 50		Hardness 60	
μ_i (MPa)	α_i	μ_i (MPa)	α_i	μ_i (MPa)	α_i
1.15E-2	0.49E+1	-1.24E-6	0.11E+2	-4.19E-4	0.61E+1
3.42E-1	0.24E+1	2.68E-1	0.34E+1	3.62E-1	0.33E+1
2.40E-14	-0.23E+2	3.23E-14	-0.23E+2	-2.90E-14	-0.22E+2

고무와 접촉되어 있는 금속판재와 브래킷(bracket)의 Young's Modulus는 206 GPa이고 프와송의 비는 0.3의 값을 사용하였다.

경계조건은 3축 방향에 대한 강성을 고려하기 위해 각각 달리하였는데 수직 방향 하중(vertical force, Fz), 길이 방향 하중(longitudinal force, Fx)과 횡 방향 하중(lateral force, Fy)이 각각 작용할 때의 강성을 해석하였다. Fig. 3은 세브론 스프링에 작용하는 3축 방향의 하중 분력선도를 나타낸다.

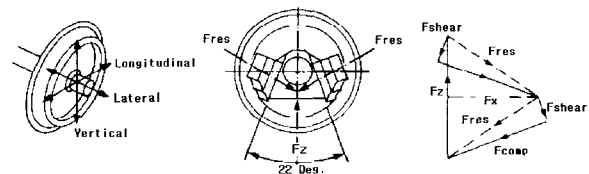


Fig. 3 Stiffness and Force Diagram

Fig. 2에서 세브론 스프링의 가장 오른쪽 금속판을 완전 고정시키기 위해 x, y, z 변위를 모두 구속시켰으며 브래킷과 대차 프레임의 좌측 체결부의 x, y, z 변위를 변화시켜 스프링의 하중-변위 관계를 구하였다.

Table 2 Specifications of Chevron Spring

	Unit	Passenger Train		
		Tare (41.7kN)	Laden (48.1 kN)	Crush (54.9 kN)
Vertical Stiffness	kN/mm	1.02 ± 10%	1.01 ± 10%	1.00 ± 10%
Longitudinal Stiffness	kN/mm	12.0 ± 10%	12.5 ± 10%	13.5 ± 10%
Lateral Stiffness	kN/mm	4.9 ± 10%	5.0 ± 10%	5.2 ± 10%
Vertical Displacement	mm	41	48	55
Vertical Load (Fz)	kN	20.85	24.05	27.45

차량의 바퀴 1개당 세브론 스프링 2개가 지지하며, 공차(tare), 승차(laden), 만차(crush)의 경우 각각 41.7, 48.1 및 54.9 kN의 하중을 지지한다. Table 2는 객차용 세브론 스프링에 요구되는 특성이다.

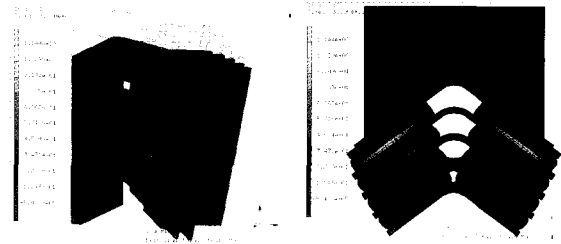
3. 유한 요소 해석 (FEA)

세브론 스프링의 해석은 각 방향의 강성을 구하기 위해서 우선 수직 방향 강성을 구한다. 그리고 요구 특성(specifications)과 비교하여 적절한 물성(경도)을 갖는 고무재료를 찾아내고 그 값으로 길이 방향 강성과 횡 방향 강성을 구한다. 길이 방향 강성과 횡 방향 강성은 각각 일정 수준(공차, 승차, 만차)의 수직 방향 하중을 받은 상태에서 추가적인 하중이나 변위(길이 방향, 횡 방향)를 작용시켜 구하게 된다.

3.1 수직 방향 해석

수직 방향의 강성을 구하기 위해 대차 프레임과 브래킷 체결부의 상단 부분을 수직-압축방향으로 변위를 주어 지지하중을 구하였다.

Fig. 4 (a), (b)는 경도 44의 고무 재료를 이용한 세브론 스프링이 승차 변위(48 mm) 상태에서 변형 상태 및 최대 주 변형률(maximum principal total strain)분포를 나타낸 것이다. 변형률은 Fig. 4 (b)에서 보는 바와 같이 하단부 첫 적층 고무 중앙 부분에서 1.14로 가장 크게 나타났다.



(a) Deformation (b) Max. Principal Total Strain

Fig. 4 Vertical Deformation and Maximum Principal Total Strain Distribution

Fig. 5는 한 개의 세브론 스프링에 작용하는 하중-변위 관계를 경도에 따라 나타낸 것이다. 경도가 높은 재료일수록 지지 하중이 높게 나오는 것을 알 수 있는데 경도 44와 경도 50의 고무 재료를 사용한 세브론 스프링이 요구조건에 비교적 잘 부합되는 것을 볼 수 있다.

강성은 하중-변위 관계로부터 구하게 되는데, 세브론 스프링에서의 강성은 하나의 액슬 박스(axle box)에 대한 하중-변위 관계로 구한다. 따라서, 이것을 지지하는 두 개의 세브론 스프링이 받는 하중과 변위로 강성을 계산하여야 한다.

Table 3은 공차, 승차, 만차 하중에서의 수직 변위와 강성을 계산한 결과이다.

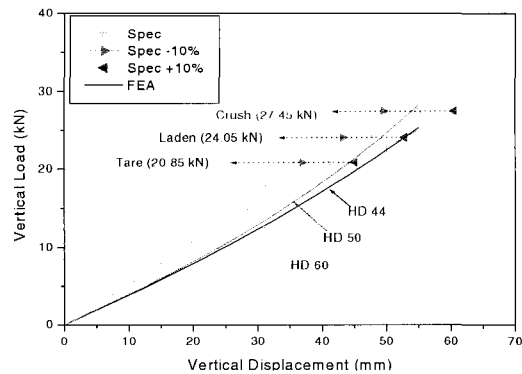


Fig. 5 Vertical Load-Displacement by FEA

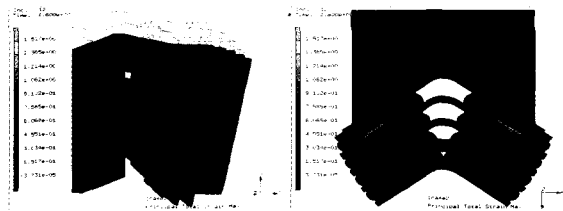
Table 3 Vertical Stiffness by FEA

Loading Condition	Vertical Properties	Rubber Hardness		
		44	50	60
Tare (41.7kN)	Displacement (mm)	47.1	44.1	35.8
	Stiffness (kN/mm)	0.89	0.95	1.16
Laden (48.1kN)	Displacement (mm)	52.7	48.0	39.9
	Stiffness (kN/mm)	0.91	1.00	1.21
Crush (54.9kN)	Displacement (mm)	59.0	54.0	44.2
	Stiffness (kN/mm)	0.93	1.02	1.24

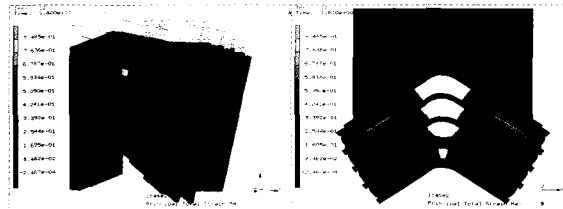
3.2 길이 방향 해석

길이 방향 해석에서는 공차, 승차, 만차 상태의 수직 하중이 작용한 후, 추가적으로 길이 방향 변위를 주어 세브론 스프링의 길이 방향 지지 하중을 구하였다.

Fig. 6 (a)는 경도 44의 경우, 승차 변위 상태(48 mm)에서 길이 방향으로 2.5 mm를 압축하였을 때, (b)는 2.5 mm를 인장하였을 때의 변형 상태 및 최대 주 변형률 분포를 나타낸 것이다. 길이 방향으로 2.5 mm 압축시켰을 때는 최대 주 변형률이 1.52, 인장시켰을 때는 0.85로 나타나, 동일한 길이 방향 변위에서 압축 과정이 인장 과정보다 2배 가까운 변형률을 보였다.

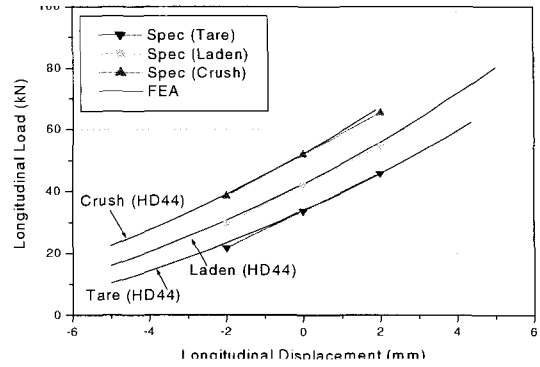


(a) 2.5 mm Compression

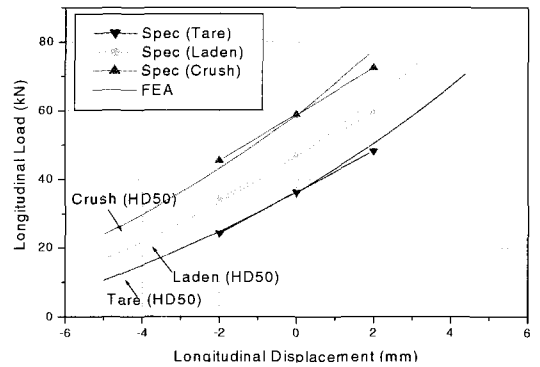


(b) 2.5 mm Tension

Fig. 6 Longitudinal Deformation and Maximum Principal Total Strain Distribution



(a) Hardness 44



(b) Hardness 50

Fig. 7 Longitudinal Load-Displacement by FEA

Fig. 7 (a), (b)는 각각 경도 44, 50의 재료에 대하여 공차, 승차 및 만차 상태에서 길이 방향 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 길이 방향 하중-변위 관계가 비선형적인 특성을 보였으며 만차 상태에서 길이 방향 하중이 가장 크게 나왔다. 길이 방향 강성을 구할 때 유의점은 Fig. 8과 같이 왼쪽 세브론 스프링이 압축 하중을 받으면 오른쪽 스프링은 인장 하중을 받게 된다. 따라서, 식 (2)와 같이 두 하중을 더한 값이 길이 방향 하중이 되며 길이 방향 강성은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$F_{total} = F_t + F_c = (K_t x_t + K_c x_c) = (K_t + K_c) \cdot x \quad (2)$$

$$K_{total} = K_t + K_c = \frac{F_{total}}{x} \quad (3)$$

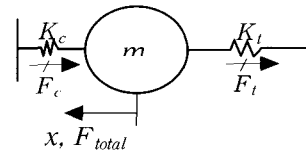


Fig. 8 Free Body Diagram of Longitudinal Load-Displacement

Table 4는 Fig. 7로부터 각 하중 상태에서 길이 방향으로 1 mm 변위를 주었을 때의 강성 계산 결과를 나타낸 것이다. 경도가 44인 고무재료를 사용한 스프링이 요구 특성에 잘 맞고 있음을 볼 수 있다.

Table 4 Longitudinal Stiffness Analysis by FEA

Loading Condition	Longitudinal Stiffness (kN/mm)	
	Rubber Hardness	
	44	50
Tare (41.7 kN)	11.0	12.8
Laden (48.1 kN)	12.1	14.5
Crush (54.9 kN)	13.9	17.5

3.3 횡 방향 해석

횡 방향 해석에서는 길이 방향 해석과 마찬가지로 스프링에 공차, 승차 및 만차의 수직 하중이 각각 작용하고 추가적으로 횡 방향 변위가 작용하였을 때의 횡 방향 하중을 구하여 강성을 구한다.

Fig. 9 (a)는 경도 44인 고무 재료를 이용하여 승차 변위 상태(48 mm)에서 횡 방향으로 10 mm 이동하였을 때 변형 모습이며 (b)는 이 때의 최대 주 변형률 분포이다. 최대 주 변형률은 Fig. 9 (b)에서 보는 바와 같이 세브론 스프링의 하단부의 왼쪽 상층 고무에서 2.24로 비교적 큰 변형률을 보였다.

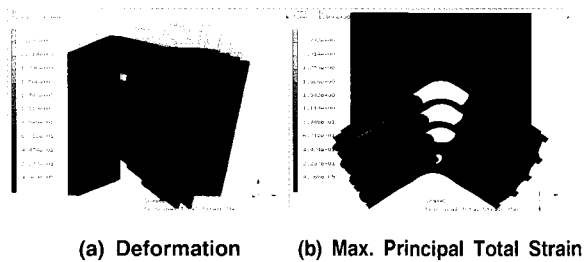
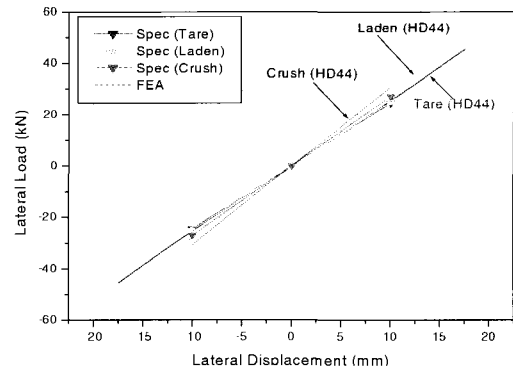
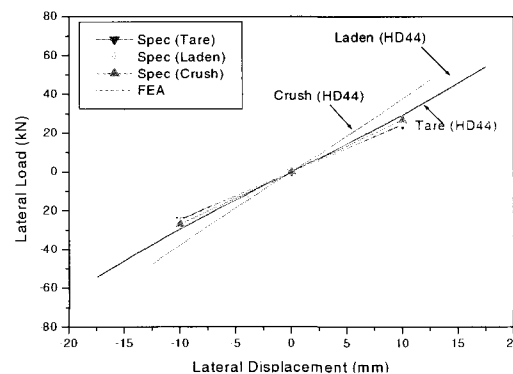


Fig. 9 Lateral Displacement and Maximum Principal Total Strain Distribution

Fig. 10은 경도 44, 50의 고무를 사용할 때 공차, 승차, 만차일 때의 횡 방향 하중-변위 관계를 나타낸 것인데 횡 방향 변위가 커질수록 지지하중이 선형적으로 증가하였다. Table 5는 각 하중 상태에서 각 경도에 따른 횡 방향 강성을 계산한 것이다. 경도 44인 고무 재료가 요구 특성에 잘 부합되고 있다.



(a) Hardness 44



(b) Hardness 50

Fig. 10 Lateral Load-Displacement by FEA

Table 5 Lateral Stiffness Analysis by FEA

Loading Condition	Lateral Stiffness (kN/mm)	
	Rubber Hardness	
	44	50
Tare (41.7 kN)	5.00	5.96
Laden (48.1 kN)	5.54	6.54
Crush (54.9 kN)	6.04	7.50

3.4 적층 고무 형상 변화에 따른 영향

설계변수로 적층 고무 두께 변화와 중앙 여유공간 유무에 따른 영향을 알아보기 위해 두 가지 다른 모델을 적용시켜 보았다. model 1은 현재의 모델이고, model 2는 적층 고무 두께만을 33% 감소시킨 모델이고, model 3은 현재의 모델에서 적층 고무의 중앙 여유 공간을 두지 않은 모델이다.

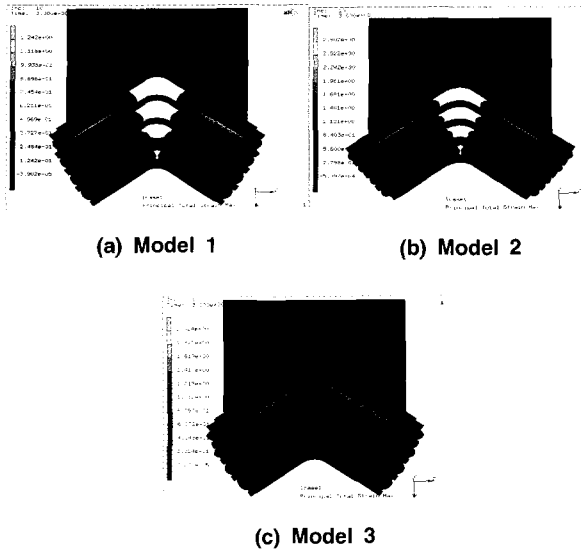


Fig. 11 Maximum Principal Strain Distribution

Fig. 11은 각 모델을 수직 방향 변위 55 mm를 주었을 때 최대 주 변형률 분포를 비교한 것이다. 적층 고무 두께를 33% 줄인 model 2에서 가장 큰 변형률 2.80을 보였으며 중앙에 여유공간을 두지 않은 모델이 2.02로 그 다음으로 높았다. 따라서, 세브론 스프링은 적절한 적층 고무 두께를 선택하고 중앙에 공간을 두는 것이 변형률을 현저히 감소시킬 수 있어 피로 수명 측면에서 좀 더 양호한 결과를 기대할 수가 있다.

Fig. 12는 각 모델의 하중-변위를 비교한 것이데 model 1, model 2, model 3 순으로 강성이 크게 나타났다.

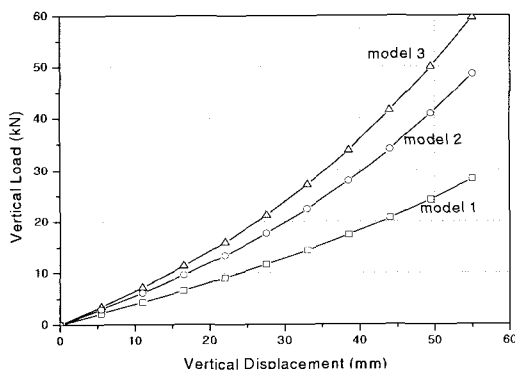


Fig. 12 Load-Displacement of Each Model by FEA

3.5 세브론 각의 변화에 따른 영향

세브론 각의 변화에 따른 영향을 알아보기 위해 두 가지 다른 모델을 적용시켜 보았다. 현재의 모델인 106° 와 세브론 각을 10° 증가시킨 116° 모델의 해석 결과, Table 6과 같이 세브론 각을 증가시키면 수직 방향 강성, 길이 방향 강성, 횡 방향 강성이 감소하는 경향을 보였다. 특히, 횡 방향 강성이 가장 큰 변화를 보였고 수직 방향 강성, 길이 방향 강성 순으로 강성이 감소하였다.

Table 6 Effect of Chevron Angle on Stiffness by FEA

Stiffness (kN/mm)	Loading Condition	Chevron Angle		Reduction (%)
		106°	116°	
Vertical	Tare	0.95	0.76	20.0
	Crush	1.02	0.87	14.3
Longitudinal	Tare	12.8	11.4	10.7
	Crush	17.5	15.8	9.6
Lateral	Tare	5.96	3.99	33.0
	Crush	7.50	4.94	34.1

해석 결과로부터, 강성을 높이기 위한 방법 중의 하나로 세브론 각을 작게 하면 된다는 것을 알 수 있었다.

4. 세브론 스프링 시제품 제작 및 특성 시험

Fig. 13은 세브론 스프링의 시제품 제작을 위한 금형의 분해된 모습이며 Fig. 14는 조립된 모습이다. 객차용 세브론 스프링의 고무는 유한요소해석 결과로부터 가장 적절한 경도인 44를 사용하였다.

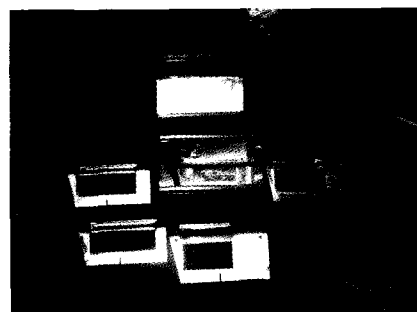


Fig. 13 Disassembled Die of Chevron Spring

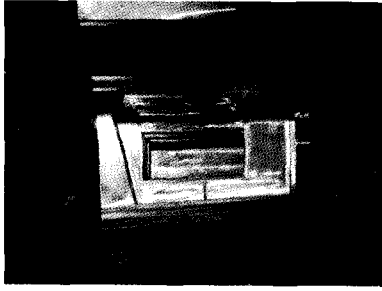


Fig. 14 Die Assembly of Chevron Spring

4.1 수직 방향 강성 시험

Fig. 15는 세브론 스프링의 여러 가지 요구성능 항목 중에 가장 기본이 되는 수직 방향 시험 모습이다. 한 개의 세브론 스프링으로 시험하기 위하여 하중 블록의 오른쪽에 LM가이드를 설치하였다. Fig. 16은 수직 방향 지지하중의 측정 결과를 요구 조건과 같이 나타낸 것인데 비교적 잘 일치하며 수직 방향 강성은 공차에서 1.03, 승차에서 1.02, 만차에서 1.00 (kN/mm)로써 제품의 주어진 요구특성과 잘 일치하였다.



Fig. 15 Vertical Test of Chevron Spring

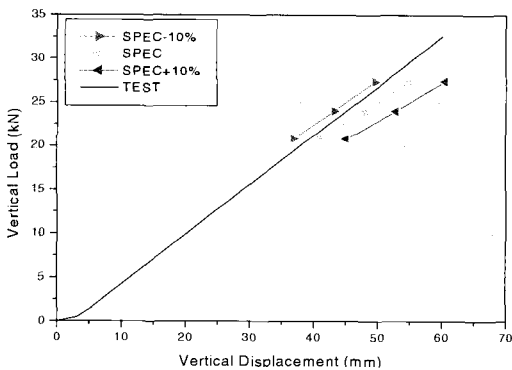


Fig. 16 Experimental Vertical Load-Displacement

4.2 길이 방향 강성 시험

Fig. 17은 세브론 스프링의 길이 방향 시험 모습이다. 길이 방향 시험 방법은 수직방향으로 각각 공차, 승차 및 만차 변위를 가한 상태에서 길이 방향으로 ± 5 mm 변위를 주어 길이 방향 지지하중을 측정하였다. Fig. 18은 길이 방향 지지하중 측정 결과를 나타낸 것이다. 길이 방향 강성은 공차에서 11.4, 승차에서 13.2, 만차에서 14.1 (kN/mm)로써 요구조건과 잘 일치하였다.

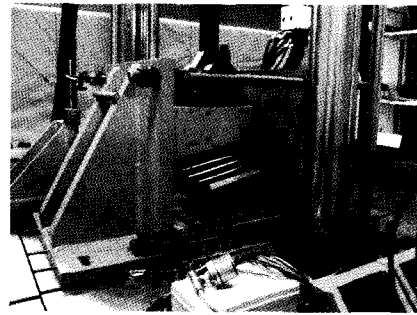


Fig. 17 Longitudinal Test of Chevron Spring

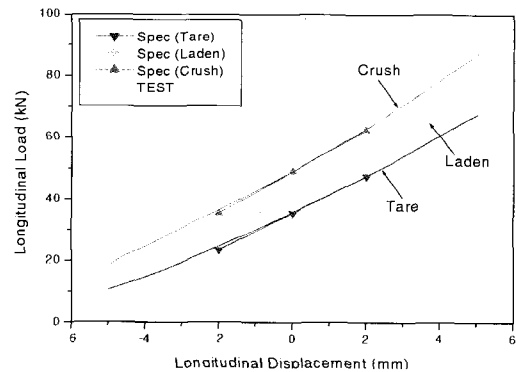


Fig. 18 Experimental Longitudinal Load-Displacement

4.3 횡 방향 강성 시험

Fig. 19는 세브론 스프링의 횡 방향 시험 모습이다. 시험 방법은 수직 방향으로 각각 공차, 승차 및 만차 변위를 가한 상태에서 횡 방향 지지 하중을 측정하였다. Fig. 20은 횡 방향 지지하중을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 횡 방향 강성은 공차에서 4.45, 승차에서 4.69, 만차에서 4.87 (kN/mm)로써 요구조건과 잘 일치하였다.



Fig. 19 Lateral Test of Chevron Spring

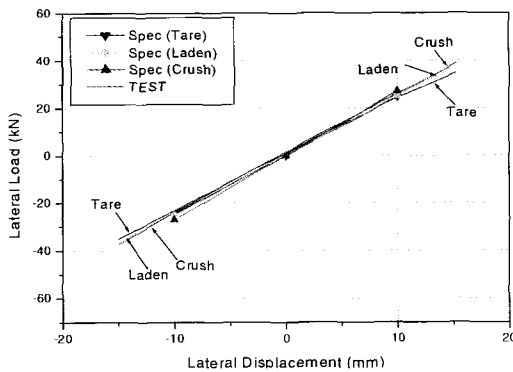


Fig. 20 Experimental Lateral Load-Displacement

5. 결론

본 연구에서는 철도차량에 사용되는 세브론 스프링의 특성을 비선형 유한요소해석을 이용하여 강성을 예측 및 분석하였고 시제품을 제작한 후 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- i) 고무 경도 변화에 따른 세브론 스프링의 강성은 민감하게 변화하며 경도 44의 고무를 사용할 경우 요구 특성과 잘 일치하였다.
- ii) 길이 방향 강성과 횡 방향 강성은 공차, 승차 보다 만차 상태에서 가장 크게 나왔으며, 실험 결과 하중-변위 관계에서 길이 방향은 비선형적인 특성을 보였으며 수직 및 횡 방향은 선형적인 특성을 보였다.
- iii) 적층되는 고무의 중앙에 여유 공간이 있는 경우, 공간이 없는 경우에 비해 최대 주 변형률이 현저히 감소되어 피로 수명 측면에서 유리한 형상임을 예측할 수가 있었다.

- iv) 세브론 각이 커지면 모든 방향의 강성이 감소하였으며, 세브론 각을 10° 증가시켰을 때 횡 방향 강성은 30% 이상 크게 감소하였다.

참고 문헌

1. 고속전철 현가장치 개발 연구보고서, 96-II-5-2, 1996
2. 김완두 외, "공기스프링용 코드강화 고무 벨로우즈 국산화 개발 보고서", 한국기계연구원, 2000
3. 김완두, "고무 부품설계의 유한요소 해석기술 이용", 기계저널, Vol. 38, No. 12, pp. 49-54, 1998
4. Nonlinear FEA of Elastomer, MARC Analysis Research Corporation, p. 9, 1996
5. 김완두 외, "초 탄성체 고무류 기계부품의 변형해석 및 설계기술 개발", 한국기계연구원 연구보고서, 과학기술부 98-NG-01-03-A-01, 1998

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기계설비 요소기술 개발사업)으로 지원되어 수행하였습니다.