

궤간 가변 윤축의 압축스프링에 대한 강도해석

Strength Analysis for Compressed Coil Spring in the Gage - Adjustable Wheelset System

김철수*, 안승호**, 정광우**, 장승호***, 장국진****, 김정규*****
Kim, Chul-Su Ahn, Seung-Ho Chung, Kwang-Woo Jang, Seung-Ho
Jang, Kook-Jin Kim, Jung-Kyu

ABSTRACT

To reduce the cost and the time of transport in Eurasian railroad networks such as TKR(Trans-Korea Railway), TCR(Trans-China Railway) and TSR(Trans-Siberia Railway) owing to the problem of different track gauges (narrow/standard/broad gauge), it is important to develop the gauge - adjustable wheelset system to adapt easily to these gauges. Moreover, this system accomplishes periodically a conversion operation from the gauge variable segment between different gauge. Gauge adjustable compression coil spring during conversion process accomplishes repetitively a central role for operation mechanism between flange and locking part. Therefore, to assure the safety of the gauge-adjustment wheelset system, it is necessary to stress analysis of the optimized spring in the system. In this study, it was performed to optimal design of the spring for stress analysis by using the genetic algorithm.

1. 서론

궤간가변 윤축시스템(gauge - adjustable wheelset system)의 철도차량은 유라시아 대륙철도 연계운행 시 궤간차이를 극복할 수 있는 효과적인 방안으로서 보고⁽¹⁻⁴⁾되고 있다. 현재 세계 각국의 철도산업계에서는 이에 대한 독자적 기술을 개발하여 시험운행하거나 상용화 및 개선하고 있다. 이에 대한 국내의 연구⁽⁵⁻⁷⁾는 해외선진국의 특허에 대응하여 신개념 메커니즘 특허를 출원하였다. 궤간 가변 윤축시스템은 플랜지, 차륜, 압축스프링, 스프링홀더, 잠금기구, 축 및 고정캡으로 구성되어 있다. 만약 궤간가변 윤축시스템을 장착한 화차가 국내 철도망(TKR)으로 부터 유라시아 대륙의 TCR/ TSR에서 운행한다고 가정하면, 개발 중인 이 시스템은 이중궤간사이의 궤간변환구간에서 주행 시 주기적으로 변환 작동을 수행한다. 이러한 변환과정에서 궤간가변 압축스프링은 플랜지와 잠금기구 사이에서 삽입 및 해제 시 동작메커니즘을 원활히 하도록 하는 중추적인 역할을 반복적으로 수행한다. 따라서 개발 중인 궤간가변 화차의 건전성을 확보하기 위해서는 궤간가변 압축 스프링의 강도에 대한 평가가 중요하다. 따라서 본 연구에서는 궤간가변 윤축시스템의 안전성을 확보하기 위하여 유전자알고리즘을 이용하여 궤간가변 압축스프링의 최적 설계안을 제시하고, 압축스프링의 강도를 평가하고자 한다.

* 한국철도대학 차량기계과, 회원

E-mail : chalskim@paran.com

TEL : (031)460-4215 FAX : (031)462-2944

** 한국철도대학 운전기전과

*** 철도기술연구원 선임연구원

**** 한양대학교 대학원

***** 한양대학교 기계공학부

제 2 장 이론 해석

2.1 압축코일스프링의 이론해석

축방향하중 P 하에 압축 코일스프링의 단면에는 전단응력, 코일방향의 압축력 및 굽힘 응력이 작용하며, 이들을 함께 고려한 수정계수(Wahls' coefficient, K)로부터 수정 전단응력(modified shear stress, τ)은 식 (1)과 같다.

$$\tau = K \frac{16rP}{\pi d^3} = K \frac{8C^3}{\pi D^2} P \quad (1)$$

여기서 D 는 압축 코일스프링의 평균지름, r 은 $2r = D$ 로서 코일 스프링의 평균반지름, d 는 소선의 지름, 그리고 C 는 $C = \frac{D}{d} = \frac{2r}{d}$ 로서 스프링지수이다. 스프링의 특성을 규정짓는 스프링 상수(spring's constant, k)는 식(2)와 같다.

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{Gd^4}{8N_a D^3} = \frac{Gd}{8N_a C^3} = \frac{Gd^4}{64N_a r^3} \quad (2)$$

여기서 δ 는 스프링 끝단의 변위량, N_a 은 유효감김수(총감김수 - 2)이고, G 는 전단계수이다. 생산비용을 결정짓는 스프링 부피 V 는 식 (3)과 같다.

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \cdot 2\pi r N_a \quad (3)$$

이로부터 케간가변 압축스프링의 최적설계안은 식 (1)의 수정전단응력을 최소화하면서, 식 (3)의 부피도 작도록 하는 것이다.

2.2 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘⁽⁸⁾은 자연선택과 유전론에 근거하여 개발된 전역적인 최적화 설계 방법이며, 이 알고리즘은 최적화하려는 목적함수에 대하여 미분할 필요 없는 전역적인 최적 알고리즘이다. 유전자 알고리즘을 이용한 일반적인 최적화 과정 동안 초기 개체군은 최적화 문제에 대한 가능한 해집단을 의미하며, 각 가능한 해를 개체라 한다. 각 개체는 일반적으로 랜덤하게 발생된 "0"과 "1"의 조합으로 코드화된 이진 스트링(binary string)이다. 여기서 이진 스트링은 가능한 해를 코드화한 것으로 본 논문에서는 스프링 설계에 직접적인 영향을 주는 변수들로서, 소선지름, 코일의 안지름 및 총 감김수이다. 디코딩(decoding)은 이진 스트링으로 코드화되어 있는 입력 변수를 실수 값으로 변환하는 과정이다. 적합도 평가는 유전 알고리즘에서 각 개체의 생존을 결정하는데 사용된다. 각 문제에 대한 적합도(fitness value)가 큰 개체일수록 더 좋은 해를 의미하므로 적합도 함수(fitness function)는 사용자가 최대화하기를 원하는 목적 함수(object function)를 의미한다. 본 연구에서는 코일스프링의 안정성에 대한 식 (1)의 수정전단응력과 경제성에 대한 식 (3)의 스프링 부피를 적합도 함수로 결정하였으며, 설계변수들(소선지름, 코일의 안지름 및 총 감김수)로부터 적합도를 계산하였다. 이러한 개체군은 유전 연산자인 재생산, 교차, 돌연변이를 이용하여 결정된다. 유전 알고리즘의 성능에 영향을 미치는 제어인자는 개체수, 교차율, 돌연변이율이다. 본 연구에서는 가능한 적은 개체수에서 양호한 결과를 얻기 위하여 Reeves의 연구⁽⁹⁾에 준하여 제어인자를 설정하였다.

2.3 피로 시험

소재의 피로특성 평가를 위한 피로시험 조건은 상온 하에서 응력비(stress ratio, R)는 -1이고, 부하 형태는 반복 비틀림 하중이며, 시험주파수는 23.3 Hz이다. 피로시험편은 지름이 20mm의 환봉형으로서 만능식 유압 서어보식 피로시험기(Model: INSTRON 8504)를 통해 S-N곡선을 얻었다. 응력집중계수(stress concentration factor, k_t)는 1.02이다.

궤간가변 압축스프링의 피로시험은 50톤 만능식 유압 서어보식 피로시험기(Model: INSTRON 8504)에 저온 챔버 내 스프링을 장착하고, 온도 범위 293~193K(20~ -80°C)하에서 일정진폭 변위제어로서 수행하였다. 변위범위는 이전 연구 결과로⁽¹⁰⁾부터 궤간가변구간에서 주행 시 최대 진폭을 고려하여 50mm이다. 그리고 궤간 가변 압축 스프링은 이전연구결과⁽¹⁰⁾로부터 폴란드 궤간가변구간에서 시속 10~30 km로 주행 시 1회 1.5~4.5초동안 작동하므로 하중파형은 0.2~0.4Hz의 정현파이다. 내구성 시험 횟수는 상온 및 저온에서 각각 6개이다. 스프링의 내구성 평가 기준은 궤간가변구간의 이용횟수를 감안하여 10^4 회까지 파손여부 및 스프링상수 변화이다.

3. 실험결과 및 해석

3.1 압축스프링 재료강도평가

3.1.1 소재의 기계적 특성

본 연구에서 스프링강재로 선택한 재질은 SUP9강(JIS G 4801 spring steel)이다. 이 재질은 일반적으로 차량용 스프링 소재로서 사용되는 것이다. 소재의 인장시험은 KS B 0802에 준하여 수행하였으며, Table 1은 화학적 성분을 나타낸 것이다. Fig. 1은 압축스프링 소재에 대한 저온 및 상온 하에 응력-변형을 선도의 일례를 나타낸 것이다. 그림에서 실선(—)과 점선(---)은 각각 상온(293K) 및 저온(213K) 하에서 얻어진 결과이다. 상온 및 저온에서 인장강도는 각각 1228MPa 및 1245MPa로 얻어졌으며, 온도의 감소에 따라 인장강도는 17MPa정도 상승하였지만 연신률은 17%저하 하였다. 이러한 변동은 상온의 소재규격(JIS G 4801)에 적합하므로 온도감소에 따른 소재 선택은 적합하다고 사료된다.

3.1.2. 소재의 피로특성

소재의 피로특성을 평가하기 위하여, 피로시험 조건은 상온 하에서 응력비(stress ratio, R)는 -1이고, 부하형태는 반복 비틀림 하중이며, 시험주파수는 23.3 Hz이다. 피로시험편은 지름이 20mm의 환봉형으로서 만능식 유압 서어보식 피로시험기(Model: INSTRON 8504)를 통해 S-N곡선을 얻었다. 응력집중계수(stress concentration factor, k_t)는 1.02이며, Fig. 2는 실험에 의한 재료의 S-N곡선을 나타낸 것이다. 피로수명과 응력진폭의 관계식은 식 (4)와 같다.

$$\sigma_a = 734.51(N_f)^{-0.0292} \quad (4)$$

여기서 σ_a 는 응력진폭이고, N_f 는 응력진폭에서 시험편이 완전 파손될 때의 사이클 수이다. 피로한도는 $N_f=10^7$ cycles기준으로 459MPa이다.

3.2 유전자 알고리즘을 이용한 압축코일스프링 최적설계

유전자 알고리즘을 이용한 최적설계의 변수들은 코일의 형상을 규정짓는 소선지름 d , 코일의 안지름 D_i 및 총 감김수 N_t 이다. 이러한 설계변수들에 대한 각각의 구속 조건은 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{소선의 지름: } & 25 \leq d \leq 40 \\ \text{코일의 안지름: } & 360 \leq D_i \leq 410 \\ \text{총감김수: } & 5 \leq N_t \leq 8 \end{aligned} \quad (5)$$

Table 1 Chemical composition of material

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Specification*	0.52~ 0.60	0.15~ 0.35	0.65~ 0.95	0.035 >	0.035 >	-	-
test	0.57	0.264	0.047	0.0131	0.065	-	0.0065

*JIS 규격: SUP9 steel

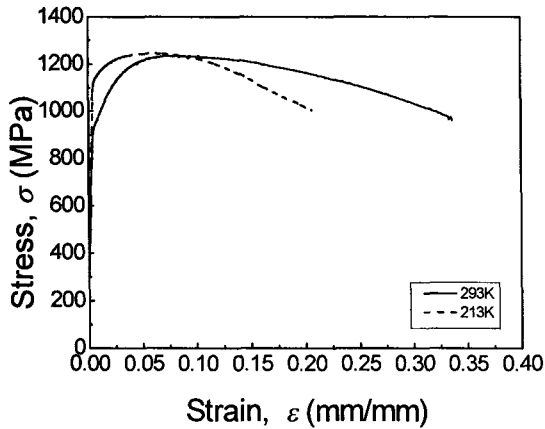


Fig. 1 Stress - strain curve of SUP9 steel

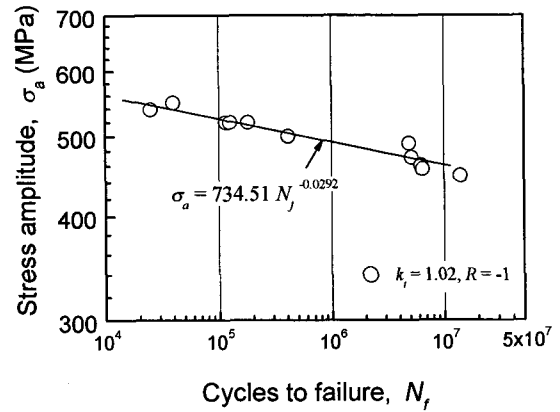


Fig. 2 S-N Curve of SUP9 steel

설계변수의 구속범위는 스프링 제조공정의 가능성 및 웨간 잠금 부품과 윤축사이에 간섭이 일어나지 않은 범위 내에서 설정하였다. 이로부터 정규화 된 설계 변수들 x_i 의 구속 조건은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{소선의 지름: } x_1 &= d - 25/15 \\
 \text{코일의 안지름: } x_2 &= d - 360/60 \\
 \text{총감김수: } x_3 &= d - 5/3
 \end{aligned} \tag{6}$$

압축코일스프링의 최적설계안은 안전성 측면에서 수정전단응력 및 부피를 최소로 갖도록 하는 것이다. 그러나 웨간 가변 화차 설계 시 경제적인 측면보다 안정성 확보가 매우 중요하므로, 본 연구에서는 응력에 가중치를 1.2를 곱하여 식 (7)과 같은 적합도 함수를 도출하였다.

$$\text{Minimize: } J = 1.2J_1(\text{Stress}) + J_2(\text{Volume}) \tag{7}$$

여기서 J 는 설계 변수에 대한 적합도함수의 합으로서, 최적설계의 목적함수이다. 또한 J_1 및 J_2 는 각각 응력 및 부피에 대한 적합도 함수로서 그림 3과 같다. 최적 조건은 유전자 알고리즘을 이용하여 J 값이 최소화 되는 경우를 찾는 것이다.

유전자 알고리즘의 제어인자의 초기 값 개체수는 10이고, 교배율은 0.95 그리고 돌연변이율은 0.01이다. 각 개체의 유전자는 각각 10비트씩 선정하여 최적점을 찾도록 유도하였다. 그리고 각 세대에서 선택 조건은 우선 엘리트 방법을 취한 후에 이를 다음세대로 유지하였으며, 선택법으로는 룰렛방법을 이용하였다.

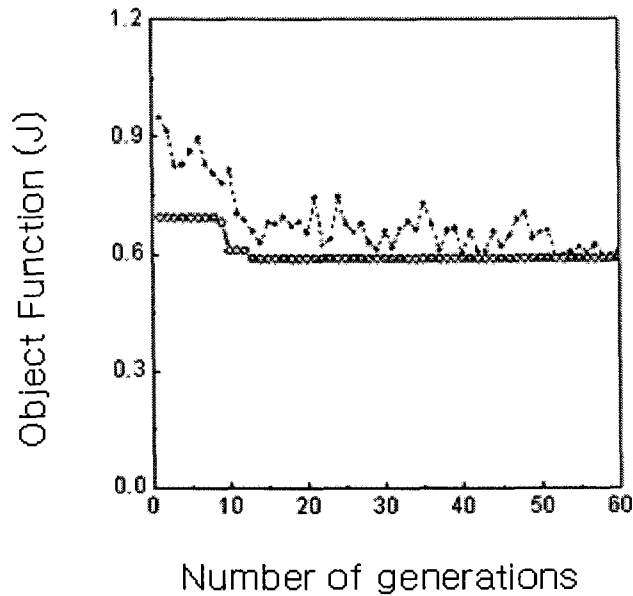


Fig. 3 Variation of a Object Function with a increasing of number of generations

Fig. 3은 60세대까지 수행한 유전자 알고리즘의 최적화된 적합도함수 J 의 계산결과를 나타낸 것이다. 그림에서 오픈마크(○)는 적합도 함수의 평균값 변화이고, 중심점(●)은 적합도 함수의 최대값 변화이다. 그림에서 보는 바와 같이 특정한 세대에서 특이점에 빠지지 않고 12세대에서 적합도 함수 J 는 수렴하는 것을 알 수 있다. 이때의 설계변수 조건은 각각 소선의 지름 $d=30\text{mm}$, 코일의 안지름 $D_i=360\text{mm}$, 총감김수 $N_t=5.3$ 이다.

3.3 압축스프링의 유한요소해석

유전자 알고리즘에 준하여 얻어진 압축스프링의 최적설계안으로부터 실제 부품의 내구성시험을 평가하기에 앞서, 가상현실 제품 개발(Virtual product development)관점에서 안전성 검토의 연구 일환으로 이 부품의 유한요소해석에 의한 강도평가가 중요하다. 따라서 본 연구에서는 궤간가변 압축스프링의 치짐의 변화에 따라 발생하는 응력을 연속적으로 평가하고자 한다. 요소 형태는 3차원해석을 위한 8절점 직육면체 요소이며, 총 요소수와 총 노드수는 각각 13,796 및 16,500개이다. 해석에 입력 자료로서 사용되는 재료의 탄성계수는 207GPa이고, 프아송비(poisson's ratio)는 0.29이다. 요소망 모델링은 요소망 생성 전용 소프트웨어인 MSC.PATRAN⁽¹⁰⁾ 및 MSC.MENTAT⁽¹¹⁾을 사용하였으며, 응력해석 시뮬레이션은 MSC. MARC⁽¹²⁾에 의하여 수행되었다. 하중조건은 최초 자유단상태에서 궤간가변윤축의 최초 장착조건을 고려하여 40mm를 압축하고, 궤간변환 과정동안 최대 50mm만큼 압축하중을 받는 조건이다. 경계조건은 궤간가변 구간 내 스프링의 작동조건을 구현하기 위하여 스프링 한쪽단은 z 축방향 변위를 구속하고, 다른 쪽은 강체 면접촉을 부여하였다. Fig. 4는 압축변위범위($\Delta\delta$)=50mm에서 얻은 궤간 가변 압축스프링의 응력해석 시뮬레이션 결과로서 von-Mises응력분포이고, $\Delta\delta=50\text{mm}$ 하에 von-Mises응력의 최대값은 스프링의 상단부분에서 260MPa이며, 식 (1)의 이론적인 계산결과와 비교하면, 이들의 오차는 1%정도로서 매우 유사하다. 또한 소재 내구한도 459MPa와 비교하면, 매우 안전하다는 것을 알 수 있다. 이로부터 궤간변환구간에서 본 스프링은 내구한도보다 작은 응력이 산출되므로 다른 궤간가변 잠금부품들이 올바르게 작동하고 정확한 부품제작이 이루어지면 안전하게 사용될 수 있음을 시사한다.

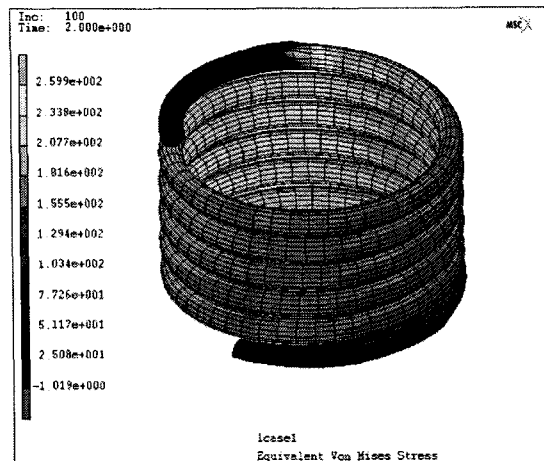


Fig. 4 result of stress analysis from press displacement 50mm

4. 결 론

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 궤간가변용 압축코일 스프링의 형상에 대한 최적설계안을 유전자 알고리즘을 이용하여 제시하였다.
2. 유한요소해석으로 얻은 $\Delta\delta=50\text{mm}$ 하에 스프링의 von-Mises응력의 최대값은 스프링의 상단부분에서 260MPa이며, 참고로 이론적인 계산결과와 비교하면 이들의 오차는 1%정도로서 매우 유사하다. 또한 소재 내구한도 459MPa와 비교하면 매우 안전하다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 미래철도기술개발사업의 일환으로 건설교통부의 연구지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) H. S. Na, S. H. Jang, J. S. Han, 2004, "A Comparative Study of the Technical Characteristics of Variable-Gauge Systems," The 2004 Spring Conference for Railway, pp. 645~651.
- (2) J. L Sanchez-Gonzalez, 1984, "Variable gauge axle," Rail International, pp. 139~148.
- (3) W. Saliger, 2000, "Gauge-Adjustable Wheelsets," Rail International, pp. 7~13.
- (4) Brochure, 2000, "Polish System of Automatic Track Gauge Changing For Wagons, Coaches And Traction Vehicles in Transcontinental Railway Traffic," SUW2000
- (5) D. W. Lee, D. S. Bea, J. S. Han, S. H. Jang, H. S. Na, 2004, "Dynamic Analysis of Variable-Gauge Wheelset," The 2004 Spring Conference for Railway, pp. 773~777.
- (6) Y. J. Lee, D. S. Bea, W. G. Kim, S. H. Jang, J. S. Han, 2005, "Contact Mechanics of Variable-Gauge Wheels With Flexible Body," The 2005 Spring Conference for Railway, pp. 379~384.
- (7) S. H. Jang, H. S. Na, J. S. Han, 2005, "On the Conceptual Design of the Gauge-Adjustable Wheelset for the North-East Asia Network," The 2005 Spring Conference for Railway, pp. 281~284.
- (8) Chang-Kyu Jin, 2000, "Genetic Algorithms and Their Applications;" Kyo Woo Sa, pp 71~101
- (9) J. J. Grefenstette, 1986, "Optimization of control parameters for genetic algorithms," IEEE Syst. Man Cybern. Vol.16 (1986), pp.122 ~ 128
- (10) MSC. SOFTWARE, 2005, MSC.PATRAN.
- (11) MSC. SOFTWARE, 2005, MSC.MENTAT.
- (12) MSC. SOFTWARE, 2005, MSC.MARC.