곡선부 주행시 궤간 가변 잠금부품들의 피로해석

Fatigue Analysis of Locking Parts in the Gauge - Adjustable Wheel Set System in the Curved Track

김철수*, 안승호**, 정광우**, 장승호***, 김정규****

Chul-Su Kim, Seung-Ho Ahn, Kwang-Woo Chung, Seung-Ho Jang, Jung-Kyu Kim

---

ABSTRACT

The gauge – adjustable wheelset system in the transcontinental railway represents a more effective way in comparison with other techniques for overcoming difference in track gauges. Moreover, freight trains having the gauge – adjustable wheelsets will be run various curved tracks of Eurasian railroad network such as TKT, TCR and TSR. Therefore, to assure the safety of the gauge – adjustable adjustment wheelset system, it is necessary to evaluate durability of locking parts in the system during freight trains' service in the curved track. In this study, it was performed to estimate fatigue life of locking parts under lateral wheel pressure by using durability simulator.

---

1. 서론

궤간가변 윤축시스템(gauge - adjustable wheelset system)의 철도차량은 유라시아 대륙철도 연계운행시 궤간차이를 극복할 수 있는 효과적인 방안으로서 보고[1-3]되고 있다. 현재 세계 각국의 철도산업계에서는 이에 대한 독자적 기술을 개발하여 시험운행하거나 상용화 및 개선하고 있다. 국내의 경우 해외선진국의 궤간가변 메커니즘 특허에 대응하여 신개념 메커니즘 특허를 확보하고, 궤간가변 화차의 설계단계이다. 따라서 개발중인 궤간가변 화차의 건전성을 확보하기 위해서는 설계진행중인 궤간 가변 잠금부품들의 피로수명에 대한 평가가 중요하다.

궤간가변 윤축시스템에 관련한 연구들[1~6]은 각국의 독자적인 기술로서 활발히 추진되어 상용화되고 있다. J.L.Sanchez-gonzalez[2]는 기술 및 경제적 측면에서 유럽의 궤간가변 윤축의 개발현황을 정리하였고, W.Saliger[3]는 궤가가변 윤축의 필요성과 함께 유럽의 RAFIL/DBAG-V형, SUW2000 및 Talgo 시스템의 기술적 특징을 소개하였다. 국내의 경우 장승호 등[4-6]은 현재 개발 중인 궤간가변장치 개념설계안을 제시하였다. 이상의 연구들에서 해외각국은 자국 상황에 적합한 독자적 기술을 개발하여 특허에 의하여 보호하고 있으므로 국내에서는 이에 대응한 체계적인 연구가 매우 중요하다. 따라서 국내 궤간가변 화차의 안전성을 확보하기 위하여 각 시스템 및 부품들의 피로해석을 통한 수명을 예측하여 설계에 반영하는 것이 필요하다.

한편 궤간가변 윤축시스템을 장착한 화차가 국내의 TKR로 부터 유라시아 대륙의 TCR/TSR에서 운행한다고 가정하면, 많은 궤간변환구간과 함께 다양한 곡선부를 주행하게 된다. 따라서 개발중인 궤간가변 윤축을 갖는 화차의 주행안전성을 검토하기 위해서는 곡선부 주행시 궤간 가변 잠금부품들의 강도

---

* 한국철도대학 차량기계과
** 한국철도대학 운전기전과
** 철도기술연구원 선임연구원
*** 한양대학교 기계공학부
및 피로수명평가가 중요하다. 본 연구에서는 곡선부 주행시 차륜의 횡압하에 궤간 가변 잠금부품들의 작용응력을 해석하고, 이에 준하여 내구성해석 시뮬레이터을 이용한 피로수명을 평가하고자한다.

제 2 장 이론 해석

2.1 피로해석 시뮬레이션 알고리듬

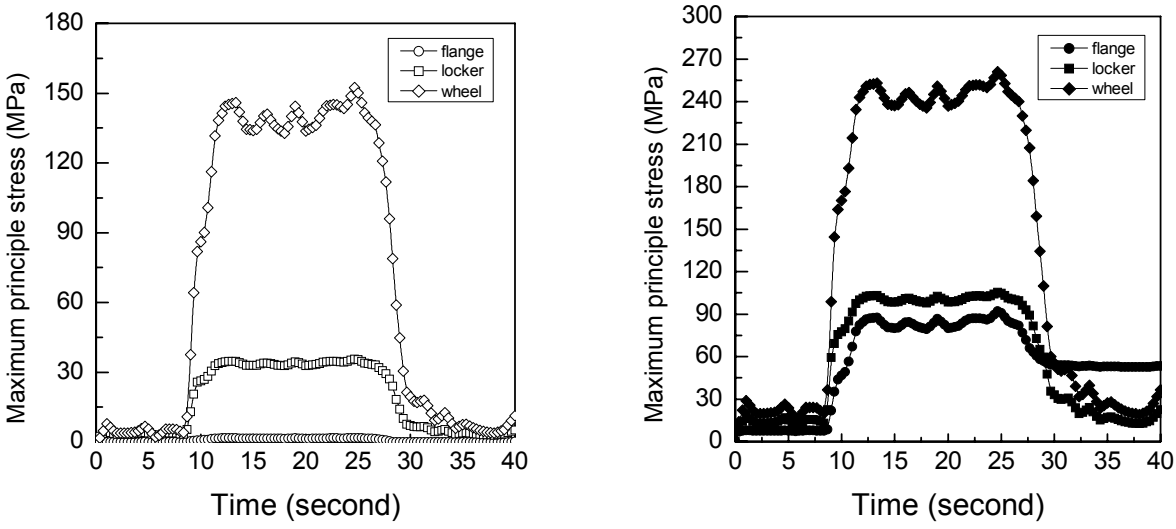
차량부품의 피로수명 평가에 있어서 가장 먼저 고려해야 될 항목은 하중이력(load history)과 재료 특성(material properties)이다. 여기서 하중이력은 해석하고자 하는 구조물이 시간영역(time domain) 혹은 주파수 영역(frequency domain)에서 반복 혹은 변동되는 일련의 하중데이터를 의미하며, 하중은 힘, 온도, 압력 및 속도 등과 같은 물리량이다. 또한 재료 특성은 기계 구조물에 적용된 재료의 기계적 특성을 의미하며, 이는 내구성 해석의 기법에 따라 상이하다.

한편 구조물에 조합하중이 작용할 경우 기계부품의 내구성 해석과정을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 각 요소 및 절점에 작용하는 시간에 따른 작용 응력 이력 텐서(applied stress history tensor)는 정적해석의 응력텐서값과 하중계수에 의하여 무차원화된 각각의 하중이력들을 곱하여 얻어진다. 이로부터 산출된 텐서량은 중첩법(superposition method)에 의하여 응력 이력 텐서량으로 표현되고, 이 텐서량은 파손이론의 주응력값에 의하여 스칼라(scalar)성분의 등가응력이력텐서(equivalent stress history tensor)로 전환된다. 이는 실질적인 손상을 주는 응력이력값만을 얻기 위하여 사이클 카운팅기법(cycle counting method)에 의하여 필터링(filtering)된다. 이후 과정을 살펴보면, 기계부품의 피로수명은 등가응력이력텐서의 횟수와 각각의 재료에 따른 피로특성곡선으로부터 마이너 손상법칙(Miner′s Damage Rule)〔7〕에 의한 누적 피로손상량(cumulative fatigue damage)을 산출하여 평가한다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 작용 응력 이력

Fig. 1은 표준궤도 및 곡선 궤도 곡선부 통과시 외측 차륜 횡압하에 잠금부품들의 최대응력이 존재하는 지점에서 시간에 따른 응력이력을 나타낸 것이다. 표준궤도의 곡선부 선로조건은 이전 연구〔8〕에 준하여 북한 경원선의 반경 300m이고〔8〕, 광궤는 동일조건에서 궤간 1520mm로 증가시킨 것이다. 여기서



(a) Standard gauge (b) Broad gauge

Fig. 1 Contact stress history of the locking part in the gauge - adjustable wheel set during a freight train's service in the curved track

차량 주행속도는 75㎞/h이며, 사용된 차량의 수는 영차조건의 궤간가변 윤축이 적용된 화차 1량이다. 해석시 사용되는 차륜의 횡압이력은 동역학 해석시뮬레이터인 ADMAMS/Rail〔9〕을 이용하였으며, UIC 518 규격〔10〕에 준하여 필터링하여 주행성능에 적합하도록 변환된 이력이다. 잠금부품들의 응력은 이전 연구에서 보는 바와 같이 곡선부 통과시 플랜지와 잠금기구 접촉, 차륜과 잠금기구 접촉, 플레지 레버에서 동시에 발생한다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 접촉응력은 표준궤간의 경우(152MPa)보다 광궤(261MPa)가 더 크다. 따라서 궤간가변 윤축을 갖는 화차의 궤간부품들은 표준궤도 보다 광궤를 주행할 경우에 큰 작용응력을 받게 된다.

3.2 피로 해석

3.2.1 재질

본 연구에 선택한 재질은 두 종류의 탄소강으로서 SM 490C와 ASTM A537이다. Table 1은 두 종류 탄소강의 기계적 특성을 각각 정리하여 나타낸 것이다. 표에서 SM 490C의 인장강도가 ASTM A537보다 크지만 연신률은 유사함을 알 수 있다.

Table 1 Mechanical properties

Materials	Young's Modulus 〔MPa〕	Yield Strength 〔MPa〕	Tensile Strength 〔MPa〕	Elongation 〔%〕
SM 490C	202,000	460	829	21.0
ASTM A537	207,000	262	480	22.0

3.2.2 피로특성

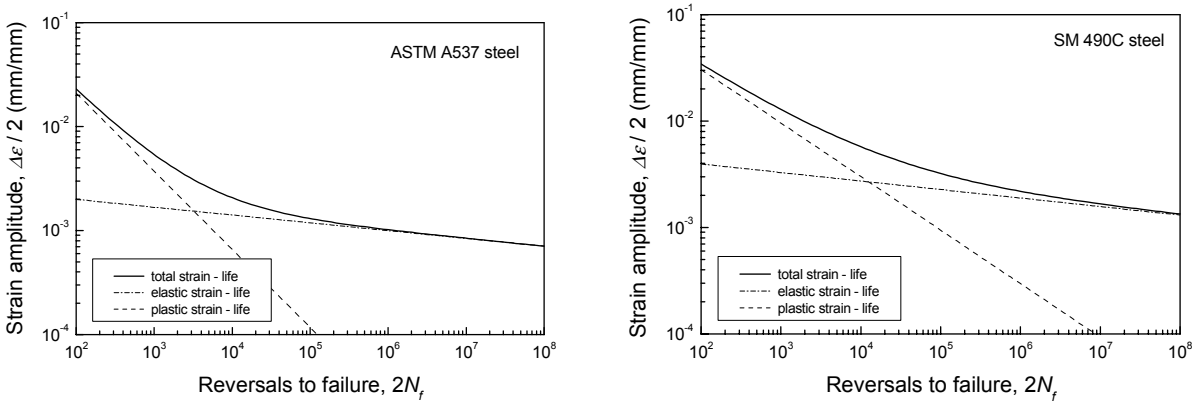
잠금부품들의 내구성 해석을 위해서는 응력해석 결과 및 하중이력과 함께 재질의 피로특성치가 필요하다.

Fig. 2는 SM 490C와 ASTM A537의 변형률-수명선도(strain life curve, 선도)를 나타낸 것이다. 이 선도들은 내구성해석의 피로특성치 자료로서 사용된다. 각 그림에서 곡선 아래의 두개의 직선은 각각 탄성변형률-수명선도와 소성변형률 - 수명선도이며, 곡선은 이들 두개의 직선을 합한 전체변형률-수명선도를 나타낸 것이다.

각 재질의 피로수명과 변형률진폭의 관계식 및 재료상수들은 식 (1)과 Table 2와 같다.

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \varepsilon'_f(2N_f)^c \tag{1}$$

여기서 $\Delta\varepsilon$는 변형률 범위(strain range), N_f는 파손사이클수(cycles to failure), σ'_f는 피로강도계수(Fatigue strength coefficient), b는 피로강도지수(Fatigue strength exponent), ε'_f는 피로연성계수(Fatigue ductility coefficient), c는 피로연성지수(Fatigue ductility exponent)이다.



(a) ASTM A537 (b) SM 490C

Fig. 2 Strain-life curves

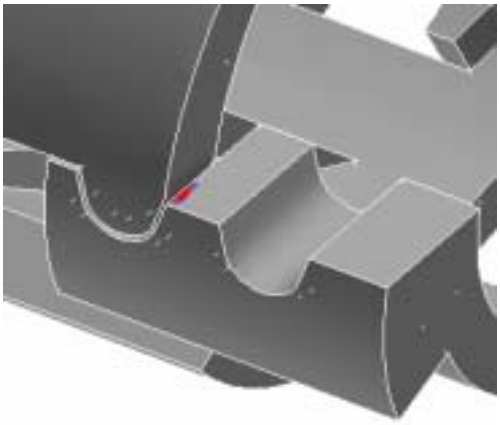
Table 2 Material constants of strain-life curves

Materials	σ'_f	b	ε'_f	c
SM 490C	1,153	-0.080	0.309	-0.503
ASTM A 537	585	-0.075	0.666	-0.751

3.2.3 피로수명평가

Fig. 3은 광궤 곡선주행시 궤간가변윤축시스템의 잠금부품들에 대한 내구성해석결과를 나타낸 것이다. 내구성해석시뮬레이션은 상용소프트웨어인 MSC.FATIGUE 2005[11]이며, 재질은 ASTM A537강으로서 피로특성은 Fig. 2(a)이며, 작용하중이력은 광궤의 차륜 횡압이력인 Fig. 1(b)이다. 잠금부품의 피로수명은 그림에서 보는 바와 같이 6.54×10^5사이클 수이다. 즉, 광궤 곡선구간 주행시 발생하는 차륜 횡력하

에 ASTM A537강의 잠금부품들에 대한 피로수명은 곡선구간 65만회 정도로 예측된다. 그리고 표준궤도



(a) total configuration (b) detail

Fig. 3 Fatigue life contour of the locking part in the gauge - adjustable wheel set during a freight train's service in the curved track

Table 3 Expected fatigue life of the locking part in the gauge - adjustable wheel set

Materials	expected fatigue life (Cycles)	
	Standard gauge	Braoad gauge
SM 490C	$\geq 1.0 \times 10^7$	$\geq 1.0 \times 10^7$
ASTM A537	$\geq 1.0 \times 10^7$	6.54×10^5

와 광궤에서 잠금부품들의 최소피로수명결과는 Table 3에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 잠금부품들의 내구성은 광궤 곡선주행시 ASTM A537강에 대한 경우를 제외하고 SM 490C의 경우에는 무한수명으로 평가되었다.

4. 결론

본 연구에서는 개발중인 궤간가변 윤축시스템의 안전성 검토의 연구의 일환으로서, 곡선부 주행시 차륜의 횡압하에 잠금부품들의 피로수명을 예측하였다. 이로 부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 곡선부주행시 궤간가변 차량의 안전성 검토를 위하여 국내 선로조건보다 비교적 곡률반경이 작은 북한 선로조건으로 부터 차륜의 횡압이력을 평가하였다. 최대 접촉응력은 표준궤간의 경우(152MPa)보다 광궤(261MPa)가 더 크다. 궤간가변 윤축을 갖는 화차의 궤간부품들은 표준궤도 보다 광궤를 주행할 경우에 큰 작용응력을 받게 된다.

2. 광궤 곡선구간 주행시 발생하는 차륜 횡력하에 ASTM A537강의 잠금부품들에 대한 피로수명은 곡선구간 65만회 정도로 예측된다. 잠금부품들의 내구성은 광궤 곡선주행시 ASTM A537강에 대한 경우를 제외하고 SM 490C의 경우에는 무한수명으로 평가되었다..

감사의글

본 연구는 국가교통핵심기술개발사업의 일환으로 건설교통부의 연구지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

〔1〕 나희승, 장승호, 한준석, 2004, “해외 궤간가변 시스템의 기술적 특성 비교 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp. 645-651.

〔2〕 J. L Sanchez-Gonzalsez, 1984, ″Variable gauge axle″, Rail International, pp. 139～148.

〔3〕 W. Saliger, 2000, ″Gauge-Adjustable Wheelsets″, Rail International, pp. 7～13.

〔4〕 이동원, 배대성, 한준석, 장승호, 나희승, 2004, “궤간가변대차용 윤축시스템의 동역학적 해석”, 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp. 773-777.

〔5〕이영주, 배대성, 김완구, 장승호, 한준석, 2005, “탄성체를 이용한 궤간가변 대차용 윤축시스템의 접촉력 해석”, 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp. 379-384.

〔6〕 장승호, 나희승, 한준석, 2005, “동북아 철도망 연계를 위한 궤간가변장치 개념설계”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 281-284.

〔7〕 ′N. E. Dowling, 1999, Mechanical Behavior of Materials, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 401~404.

〔8〕 건설교통부, 2006, “궤간가변장치 기술개발”, 국가교통핵심기술개발사업 5차년도 보고서.

〔9〕 MSC. SOFTWARE, 2005, MSC. ADAMS.

〔10〕 UIC 518, ″Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior - Safety - Track fatigue - Ride quality″.

〔11〕 MSC. SOFTWARE, 2005, MSC. FATIGUE.