

한국형 고속철도 차량의
차륜의 구름접촉 피로 예측
**The Prediction of Rolling Contact Fatigue of Wheels
for a Korea High Speed Train**

최정흠*
Jeong Heum Choi

한동철**
Dong-Chul Han

김기환***
Ki-Hwan Kim

ABSTRACT

The rolling contact fatigue of wheels for high speed trains is a matter of increasing importance. The wheel damages from fatigue crack makes noise up and safety down. RCF-caused accidents cause traffic congestion and economical costs as well as personal injuries.

In this study, we examine the rolling contact fatigue of wheels for power car running at 300km/h. Using the results of multi-body dynamic analysis and the proposed procedure of Ekberg, we calculate the fatigue index of surface-initiated fatigue, subsurface-initiated fatigue and fatigue initiated at deep material defects.

As a result, the fatigue index shows us whether fatigue will appear and in which form. In addition, we present Shakedown map on surface-initiated fatigue.

1. 서론

고속철도차량 차륜의 구름접촉 피로는 점차적으로 중요성이 증대되고 있다. 피로 균열이 성장함에 따라 차륜 파손이 발생하여 차량 소음이 증가하고 안정성이 저하되어 탈선 등의 사고로 운행 지연과 인체 상해 뿐만 아니라 경제적인 관점에서 매우 비용이 많이 든다. 피로 균열의 형성에 대해 충분히 이해하고 예측할 수 있다면 차륜에 대한 초음파 검사를 위한 시행 계획을 짤 수 있으며, 이로 인해 비용을 절약하고 위험을 방지할 수 있다.

본 논문에서는 전용선 구간에서 300km/h의 속도로 주행할 때 동력차의 첫 번째 대차의 차륜에 대한 구름접촉 피로해석을 수행하였다. 다물체 동역학 해석 결과와 Ekberg 해석 절차에 의해 표면 피로(surface fatigue), 표면하 피로(subsurface fatigue), 깊은 결함(deep defects)의 피로 개시(fatigue initiation)에 대한 해석을 수행하였다.

결과값으로 피로 지수(fatigue index)의 향으로 피로가 발생할지의 여부와 어떤 형태인지를 나타내준다. 추가적으로 표면 피로 개시의 경우 Shakedown map을 제시하였다.

2. 동적 거동 해석

2.1 차량 모델 및 주행조건

한국형 고속전철(HSR350x)의 동력차, 동력객차, 객차의 3량을 대상으로 동적거동 해석을 수행하였다. 해석 모델은 레일과 차륜(wheelset), 대차 (bogie frame)와 차체로 구성되며, 차륜과 대차사이에는 1차 현가장치로, 대차와 차체 사이에는 2차 현가장치로 연결되어 있다.

본 연구에서는 실제 한국형 고속전철에 사용된 차륜의 형상을 적용하였으며, 선로는 UIC60이 사용되었다. 또한 차량이 300km/h의 곡선주행하는 2가지의 주행 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 경부고속철도 구간의 자료를 바탕으로 곡선 궤도의 최소 곡선반경은 7km이며, 회전의 바깥쪽 레일과 안쪽 레일 간의 수직 거리를 나타내는 캔트량은 140mm 이다. 해석에는 상용 다물체 동역학 해석 프로그램이 사용되었다.[1, 2]

2.2 Hertz 이론에 의한 접촉문제 해석

차륜과 레일의 접촉과 같이 작은 접촉 면적에 큰 수직 압력이 작용하는 경우 국부적으로 소성 거동을 보이지만, 해석적인 해의 도출 및 경향 파악이 상대적으로 간편하고, 연산시간에 장점을 보이는 Hertz 방법을 사용하여 두 물체의 접촉문제를 해석하였다.

3. 구름접촉 피로현상

철도차량 차륜의 파괴는 크게 접촉 응력과 슬립에 의한 마모와 과도한 제동력이나 높은 견인력에 의해 발생하는 스펀링(spall)과 라체팅(ratchetting), 그리고 높은 응력과 접선방향 힘이 반복적으로 축적되면서 표면층이 점진적으로 변형하면서 발생하는 쉘링(shelling) 등의 구름접촉 피로파괴의 형태로 나타난다.

구름접촉 피로는 균열 성장 사이의 상호작용에 의해 발생되며, 이는 접촉 응력, 접촉면에서의 접선방향 힘, 마모 등과 관계하며, 이외에 궤도 반경, 차량형상의 크기, 현가장치, 차륜과 레일의 단면형상, 마찰력, 캔트 부족, 견인력 및 제동력, 궤도 불규칙도, 차륜과 레일의 물성치 등에 영향을 받는다.

본 연구에서는 구름접촉 피로를 표면 피로(surface fatigue), 표면하 피로(subsurface fatigue), 깊은 결함(deep defects)의 세 가지 마케니즘로 분류하여 예측을 하였다. [3, 4, 5]

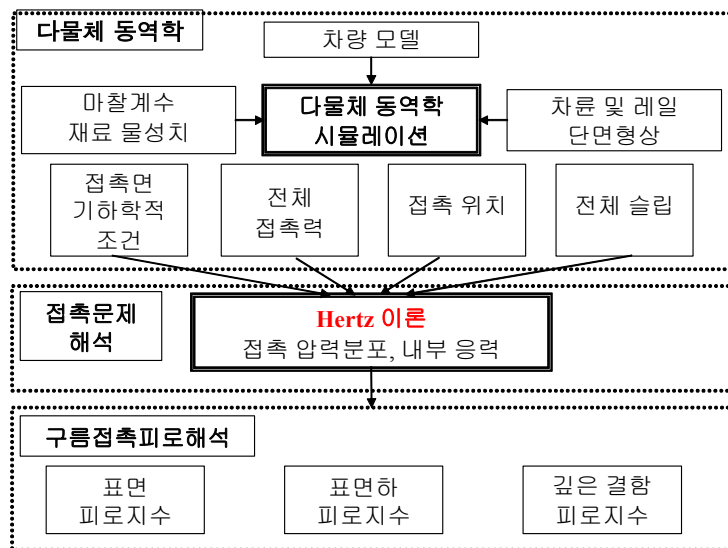


그림1. Wheel RCF Modelling Strategy

3.1 표면개시 피로(Surface initiated fatigue)

일반적으로 철도차량 차륜의 표면 개시 피로에 의한 피로 균열은 표면 재료의 과도한 소성 유동에 의해 발생된다. 이것은 라체팅(ratchetting) 또는 표면 재료의 저주파수 피로(LCF)에 의해 균열이 개시되며, 대략 최대 5mm 정도 깊이로 균열이 차륜의 재료에 성장해 들어가다가 균열이 분기되어 차륜의 답면으로 향할 때 발생한다.

최대 Hertzian 접촉압력, $p_0 = 3F_z / (2\pi ab)$ 을 순수 전단(torsion) 항복응력 k 로 나누어 정규화된 수직하중, ν 의 형태로 수직 좌표값으로 shakedown map에 적용된다.

$$\nu = \frac{p_0}{k} = \frac{3F_z}{2\pi abk} \quad (1)$$

shakedown map에서 횡좌표는 점착계수(utilized friction coefficient), μ 이며, 횡방향과 수직방향 하중사이의 비율로 정의된다.

$$\mu = \frac{F_{lat}}{F_z} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z} \quad (2)$$

여기서 F_x 와 F_y 는 각각 레일 방향, 차륜-차축 방향의 횡력이다.

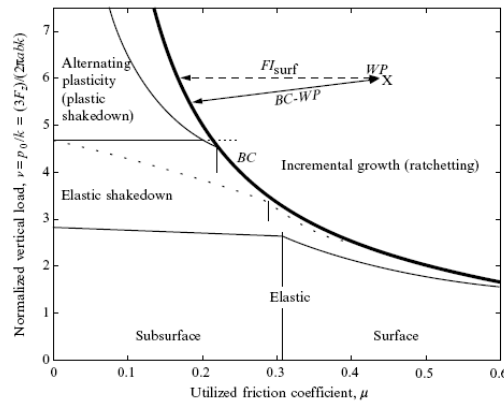


그림2. X로 표시된 work point(WP)로 나타낸 Shakedown map.

shakedown map에서 표면 피로에 대한 평가는 그림2에서 표면 유동을 의미하는 두꺼운 선으로 나타낸 BC(경계조건)에 의해 이루어진다. 이 곡선에 대한 식은 다음과 같다.

$$\nu = \frac{1}{\mu} \quad (3)$$

표면 피로 지수(surface fatigue index), FI_{surf} 는 단순화하여 다음과 같이 표현된다.

$$FI_{surf} \equiv \mu - \frac{1}{\nu} = \mu - \frac{2\pi abk}{3F_z} \quad (4)$$

표면 피로는 다음이 성립할 때 표면 유동이 발생한다고 예측한다.

$$FI_{surf} > 0 \quad (5)$$

이때 k 는 가공경화된 재료의 전단항복 한계를 적용하여야 하며, 이 값은 표면 재료의 과도한 전단 변형 때문에 초기 항복 한계보다 2배 이상의 큰 값을 가질 수 있는 점에 주의하여야 한다.

3.2 표면하 피로(Sub-surface initiated fatigue)

표면하 개시 피로는 높은 수직 하중과 나쁜 접촉 상태(작은 접촉면), 미세한 황화 망간의 침입 등과 같은 재료의 국부적으로 낮은 피로 저항 등이 상호 작용하여 발생되며, elastic shakedown에 의한 고주파 피로(high-cycle fatigue, HCF)의 결과이다.

표면하 피로의 경우, 균열이 차륜 답면으로부터 대략 3~10 mm의 깊이에서 개시되어 계속적으

로 대략 20 mm의 깊이 방향으로 성장하다가 표면으로 향하는 분기에 의해 파단이 발생하여 차륜 표면에서 커다란 조각이 떨어져 나가게 된다. 파단시 원주방향 크랙 길이는 대략 15~100 mm이다. 표면하 피로는 많은 경우 Dang Van 다축 피로개시 판별식을 이용하여 해석하며, 다음 부등식이 성립할 때 피로 손상(fatigue damage)이 도입된다고 말한다.

$$\sigma_{EQ} > \sigma_{EQ,e} \quad (6)$$

순수 구름 접촉에 종속된 철도 차륜의 경우 다음과 같이 Dang Van 등가 응력의 최대값을 근사화시킬 수 있다.

$$\sigma_{EQ,PR} \approx \frac{F_z}{4\pi ab} \quad (7)$$

잔류응력을 갖는 차륜의 순수 구름의 경우 근사 등가 응력의 결과값은 다음과 같다.

$$\sigma_{EQ} = \sigma_{EQ,PR} + a_{DV}\sigma_{h,res} \quad (8)$$

여기서 a_{DV} 는 재료 매개변수이며 τ_e 는 반복되는 비틀림일 때의 피로 한계이고, σ_e 는 반복되는 굽힘에서의 피로한계이다. 또한 $\sigma_{h,res}$ 는 잔류응력의 정수압 부분으로 인장일 때 양수이다.

$$a_{DV} = \frac{3\tau_e}{\sigma_e} - \frac{3}{2} \quad (9)$$

$$\sigma_{h,res} = (\sigma_{x,res} + \sigma_{y,res} + \sigma_{z,res})/3$$

횡방향 하중의 영향은 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\sigma_{EQ} \approx \sigma_{EQ,PR}(1 + \mu^2) \quad (10)$$

식 (6)~(10)을 정리하면, 일반적인 구름 접촉 상태에서의 표면하 등가 응력의 근사값을 얻을 수 있다. 표면하 개시 피로를 위한 피로 지수 FI_{sub} 는 다음과 같다.

$$FI_{sub} = \sigma_{EQ} \approx \frac{F_z}{4\pi ab}(1 + \mu^2) + a_{DV}\sigma_{h,res} \quad (11)$$

Dang Van 판별식은 부등식이 성립할 때 피로 손상이 발생함을 나타낸다.

$$FI_{sub} > \sigma_{EQ,e} \quad (12)$$

여기서, $\sigma_{EQ,e}$ 는 등가 피로 한계이며, 일반적으로 $\sigma_{EQ,e} = \tau_e$ 로 간주한다.

설계 피로한계는 높은 응력을 받는 재료에서 결함의 존재로 인해 피로 한계가 감소될 수 있으며, 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_{EQ,e}} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^{-1/6} \quad (13)$$

여기서, σ_w 는 직경 d의 결함을 담고 있는 재료의 피로 한계, $\sigma_{EQ,e}$ 는 커다란 결함이 존재하지 않을 때의 피로한계이며, d_0 는 응력 레벨 $\sigma_{EQ,e}$ 에서 피로 개시가 발생하는 결함의 직경이다.

3.3 재료 결함(Material defect)

깊은 결함에서 개시되는 피로는 높은 수직 하중과 mm 단위의 상대적으로 큰 재료 침입(inclusions)의 상호작용에 의해 발생하는 고주파 피로(HCF)에 의해 주로 발생하는 크랙이다. 깊은 결함은 차륜 담면 아래 10~25 mm 깊이에서 피로 크랙이 개시되며 개시와 거의 같은 깊이로 성장하다가 원주방향으로 분기되어 최종 파괴된다. 이때 25~135 mm의 원주방향 크랙 길이를 보이며, 분기가 차륜 허브를 향할 때 탈선을 유발하므로 매우 위험하다.

깊은 결함은 중간 크기의 수직 하중일 때 접촉 상태의 기하학적 조건에 거의 영향을 받지 않으므로, 하중과 접촉 기하학의 영향은 수직하중의 크기, F_z 에 의해 근사적으로 반영된다. 이러한 것 으로부터 깊은 결함에 의해 개시되는 피로에 대한 피로지수는 다음과 같이 수직 하중의 크기를 채택하여 쓸 수 있다.

$$FI_{def} \equiv F_z \quad (14)$$

정량적인 평가를 위해 피로는 다음 부등식이 성립할 때 발생하는 것으로 예측된다.

$$FI_{def} > F_{th}(z, d, H, \dots) \quad (21)$$

문턱값 F_{th} 는 차륜담면 아래에 있는 결함의 깊이 z , 결함의 크기 d 와 하중 이력(load history) H 의 함수이다. 또한 F_{th} 는 결함의 형상과 금속학적 구성(metallurgical composition), 결함간의 상호작용과도 관계가 있는 것으로 보이며, F_{th} 의 정량화는 집중적인 연구가 진행중에 있다.

4. 해석결과

그림3에, 대차 후측 오른쪽 차륜에 대한 work points가 shakedown map에 도입되었다. 여기서 전단에서의 항복 응력은 $k = 300 \text{ MPa}$ 로 하였다. 그림4에 동력대차의 우측 차륜에 대한 표면 피로 지수 FI_{surf} 의 히스토그램(histogram)이 제시된다. $FI_{surf} > 0$ 일 때 표면 피로가 예측된다는 점을 상기해보면 그림4로부터 표면 피로의 위험성이 낮은 것을 알 수 있다.

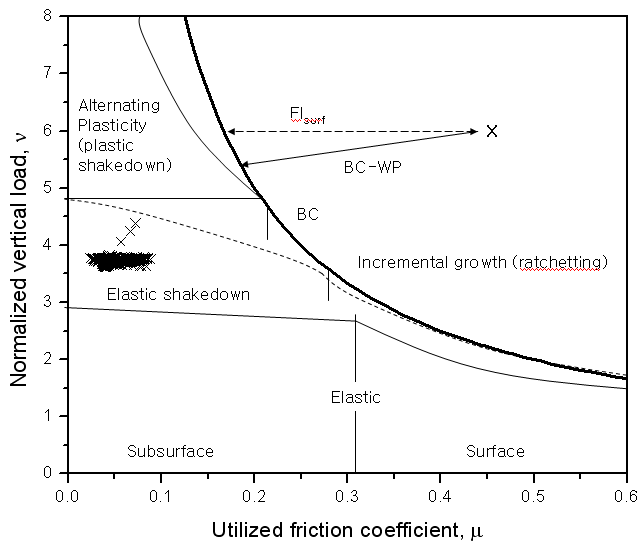


그림3. shakedown map에 표시된 오른쪽 뒤 차륜에 대한 Work points (X들의 띠로 표시됨)

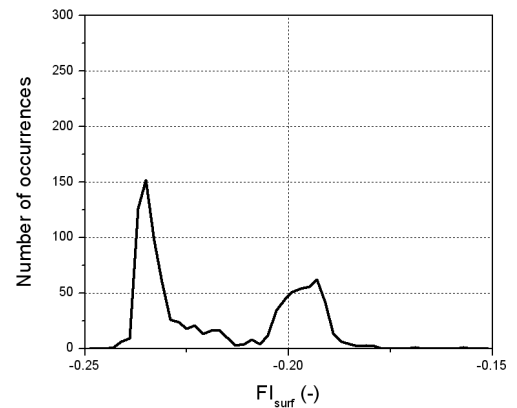


그림4. 동력대차의 우측차륜에 대한 발생수(수직좌표) vs. FI_{surf} (횡좌표). (총 1002번의 발생)

표면하 피로지수는 그림5에 나타나있다. 피로 손상을 막기 위해, 적어도 250 MPa의 표면하 피로에 대한 문턱값을 갖는 재료를 사용하여야 한다. $\sigma_{EQ,e} = 300 \text{ MPa}$ 의 등가 피로한계(전단에서의 피로 한계와 동일)을 갖는 재료를 고려하면, 식 (13)으로부터 잔류응력이 없을 때 최대 전단 응력이 발생하는 깊이에서 $d \approx 0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 의 허용 결함 크기를 가지며, 잔류 응력이 존재하면 피로 지수의 감소를 가져와 허용 결함 크기가 다소 증가하게 될 것이다.

끝으로, 깊은 결함에 해당하는 피로 지수는 그림6에 나타나있다. $FI_{def} = 76 \text{ kN}$ 과 84 kN 근처에서 응답이 자리하고 있으며, 최대값은 $FI_{def} = 86 \text{ kN}$ 정도임을 알 수 있다.

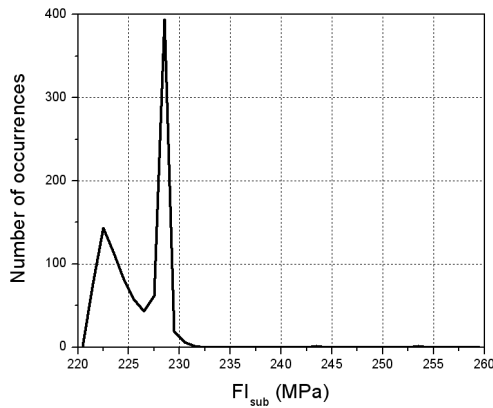


그림5. 발생 빈도(총 1000) vs. FI_{sub}

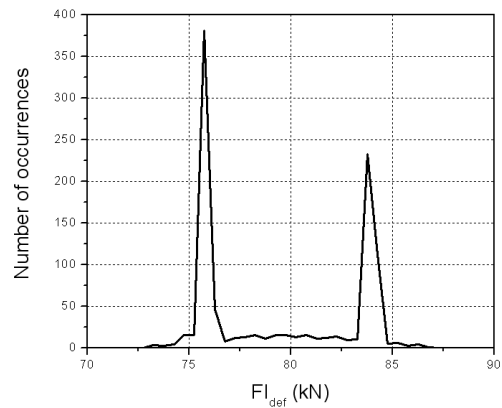


그림6. 발생 빈도(총 1000) vs. FI_{def}

5. 결론

본 논문에서는 300km/h의 속도로 주행하는 한국형 고속철도 차량을 다물체 동역학에 의해 모델링을 하고, 차륜과 레일사이의 상호작용은 Hertz 접촉이론에 근거한 Kalker's의 Simplified Theory로 해석을 하였다. 이러한 결과로부터 타원으로 정의되는 접촉면의 장반경과 단반경을 구하였고, 접촉면에 대한 수직하중으로부터 접촉면과 접촉면의 내부에 발생하는 최대 응력 등을 구하여 표면 피로, 표면하 피로, 깊은 결함에 대한 피로지수(fatigue index)를 구하였다.

해석결과, 300km/h로 주행하는 한국형 고속전철의 동적거동 해석 결과, 표면 피로는 거의 문제되지 않으며, 표면하 피로는 250 MPa의 표면하 피로에 대한 문턱값을 갖는 재료를 차륜에 사용하는 경우 문제가 되지 않으며, 잔류응력이 없다고 가정하였을 때 허용 결함크기가 $d \approx 0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 임을 알 수 있다. 깊은 결함에 해당하는 피로 지수는 $FI_{def} = 76 \text{ kN}$ 과 84 kN 근처에서 가장 빈도수가 높으며, 최대값은 $FI_{def} = 86 \text{ kN}$ 임을 알 수 있다. 차륜의 피로 균열에 끼치는 영향을 정량적으로 연구하기 위한 기준값을 제시할 수 있었다. 끝으로 위의 값들은 Hertz 이론에 근거하였으며 탄소성 FEM 해석 결과보다 과대평가되었음을 주의하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 철도기술연구원 고속철도기술개발사업으로 지원된 “고속전철 차량 레일간 상호작용 현상 Interface 연구” 과제의 연구결과 일부입니다.

참고문헌

1. 최정흠, 문태선, 김기환, 한동철(2003), “고속철도 차량의 차륜과 레일간의 마모 예측”, 2003년 추계 학술대회, 한양대학교
2. 최정흠, 한동철, 김기환(2003), “유한요소해석을 이용한 한국형 고속철도 차량의 차륜 마모 예측”, 2005년 춘계 학술대회, 철도대학
3. Anders Ekberg, Elena Kabo & Hans Andersson(2001), "Predicting Rolling Contact Fatigue Of Railway Wheels", Presented at the 13th International Wheelset Congress in Rome
4. Ekberg, A., Kabo, E., Andersson, H.(2002), "An Engineering Model for Prediction of Rolling Contact Fatigue of Railway Wheels", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 25, No. 10, pp.899-916
5. R. Lewis, R.S. Dwyer-Joyce, S. Bruni, A. Ekberg, M. Cavalletti, K. Bel Knani(2004), A New CAE Procedure for Railway Wheel Tribological Design, Proceedings of the 14th International Wheelset Congress, Orlando, Florida, USA