

속도에 따른 고속철도 레일의 마모 예측 Wear Prediction of Rail Profile in High Speed Rail according to Speed up

*이동형¹, 서정원², 권석진¹, 최하영¹, 유원희¹

**D. H. Lee(dhlee@krri.re.kr)¹, J. W. Seo¹, S. J. Kwon¹, Y. S. Ham²

¹ 한국철도기술연구원 고속철도인터페이스연구실

² 한국철도기술연구원 시험인증안전센터

Key words : Rolling contact, Wear, Rail profile, High speed rail

1. 서론

철도차량 레일에 발생하는 마모 손상은 마모형상별로 레일측면(gauge corner)과 레일두부(rail head)의 마모, 파상마모(rail corrugation)등으로 구분되며, 마모 메커니즘별로 응착마모(adhesive wear)와 박리마모(delamination wear) 등으로 구분된다. 구름접촉에 의한 마모 손상은 여러 가지 물리적, 화학적 메커니즘이 동시에 작용하여 발생하기 때문에 마모 메커니즘은 아직도 많은 연구가 필요한 부분이다.

Jendel[1]은 실제 측정된 레일 프로파일을 이용하여 동역학 해석을 수행하고 Archard 마모 모델을 이용한 차륜의 마모해석을 수행하였다. Telliskivi와 Olofsson[2]는 유한요소해석과 수정 Winkler 모델을 이용하여 접촉해석을 수행하고 소성변형을 고려한 차륜/레일의 마모해석을 수행하였다. Enblom과 Berg[3]는 차량 동역학 해석을 수행하고 Archard 마모 모델을 이용하여 제동 및 접촉상태 등 차량 운영상태를 반영한 차륜의 마모를 예측하였다. 이상과 같은 기존 연구에서는 대부분 Hertz 이론에 기초한 수치해석을 이용하여 접촉해석을 수행한다. 그러나 소성변형에 의한 손상을 해석하고 반 무한체라는 가정(half-space assumption)을 극복하기 위하여 유한요소법을 이용한 마모해석 방법을 구축할 필요가 있다.

본 논문에서는 유한요소법 및 수치해석을 통하여 레일의 구름접촉 마모예측 방법을 개발하고 고속철도 차륜과 레일의 구름접촉시 속도에 따른 레일의 마모를 예측하였다. ABAQUS를 이용하여 유한요소해석을 실시하고 Archard 마모모델을 적용하여 구름접촉시 레일의 마모를 예측하였고, 속도 증가에 따른 레일의 마모 특성을 분석하였다.

2. 마모예측 방법

3차원 유한요소해석 모델을 이용하여 마모 예측을 수행할 경우 많은 해석시간이 소요되기 때문에, 본 연구에서는 해석시간을 단축하기 위하여 2차원 유한요소해석 모델을 이용하였다. 2차원 모델의 경우 차륜과 레일의 과도한 변형으로 접촉위치가 변화하는 문제가 발생한다. 따라서 차륜의 웹(web or plate) 부위와 레일의 웹(web) 부위에 과도한 변형을 방지하기 위한 경계조건을 적용하여 3차원 구름접촉 조건과 유사하게 하였다. 또한 횡방향 하중 작용시 차륜의 회전이 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 MPC 경계조건을 적용하였다.

마모해석 절차는 기존연구[4]와 같고, 마모해석은 Archard 마모 모델을 이용하였다. 마모상수는 실험결과로부터 얻은 $k=3 \times 10^{-4}$ 을 적용하였고, 재질의 경도는 250 Hv를 사용하였다. 마모 사이클은 고속철도가 5년 운행할 경우를 고려하여 최대 3,000,000사이클까지 해석을 수행하였다.

속도에 따른 레일의 마모를 예측하기 위하여 곡선부 R=7,000 m, 캔트 130 mm 조건을 주행할 경우를 해석하였다. 속도별 윤중 및 횡압 변화량은 철도차량 동역학 해석프로그램인 VAMPIRE의 해석 결과를 사용하였다. 슬립양은 전체 접촉면적의 약 75%에서 미끄럼이 발생할 때(creepage=0.3%)를 기준으로 하였고, 이 때의 미끄럼양은 접촉 중앙과 측면의 평균 값인 0.034 mm를 적용하였다.

3. 해석결과 및 검토

마모가 발생하기 전 초기상태에서 레일 두부와 코너부위에서 최대 접촉압력은 약 1,200 MPa 이었고, 마모가 진행될수록 최대 접촉압력이 작아지고 접촉면적은 증가되었다. Fig. 1과 같이 마모가

100,000 사이클 진행되었을 경우 레일 프로파일의 접촉압력은 약 200~300 MPa로 감소하였고, 접촉은 레일 전체에서 발생하였다.

Fig 2는 속도가 증가함에 따라 레일 두부의 마모 깊이를 예측한 결과이다. 레일 두부의 경우 속도가 증가함에 따라 마모깊이는 거의 비슷하게 증가함을 알 수 있다. 그 이유는, 레일 두부의 경우 마모가 발생하면 접촉면적이 커지고 이에 따라 접촉압력이 크게 감소하게 되므로 속도에 따라 마모깊이는 큰 차이가 나지 않는다.

Fig 3은 속도에 따른 레일 게이지부의 마모 깊이를 예측한 결과이다. 레일 게이지코너 부위의 마모는 속도가 증가함에 따라 증가하며, 속도 300km/h를 기준으로 350, 400km/h일 때의 마모깊이는 약 14, 26% 증가하였다. 해석에 적용한 속도 증가에 따른 윤종의 증가는 300 km/h를 기준으로 350, 400km/h일 때 9, 19 % 증가하고, 횡압은 20, 40 % 증가하였다. 윤종 증가에 의한 레일 마모의 영향은 거의 없는 반면 횡압 증가에 의한 게이지 코너 부위의 마모는 거의 비례하여 증가하였다. 레일 게이지 코너부의 마모깊이는 일정 사이클 까지 마모깊이가 증가하다가 증가속도가 감소한다. 레일 게이지 코너부의 마모깊이가 속도에 따라 차이가 나는 이유는 마모가 발생하더라도 게이지 코너 부위의 접촉면적은 크게 변화하지 않기 때문이다. 따라서 레일 게이지부의 마모깊이는 속도가 증가함에 따라 거의 비례하여 증가한다.

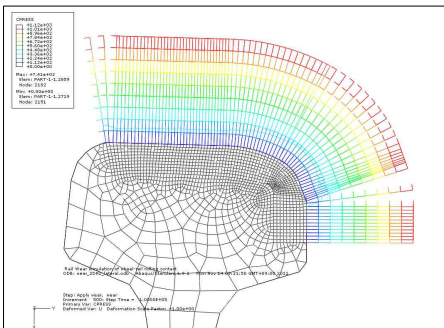


Fig. 1 Distribution of contact pressure after 100,000 cycles wear.

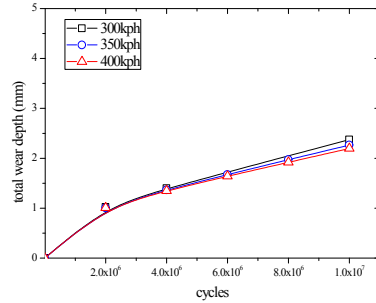


Fig. 2 Comparison of wear depth at the rail head.

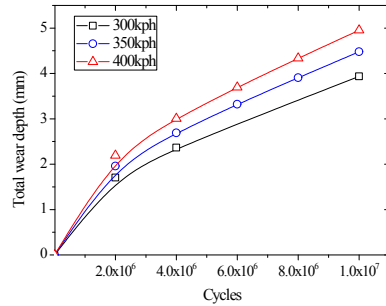


Fig. 3 Comparison of wear depth at the rail gage.

4. 결론

유한요소법 및 수치해석을 통하여 레일의 구름 접촉 마모해석 방법을 개발하고 고속철도 차륜과 레일의 구름접촉시 속도에 따른 레일의 마모를 예측하였다. 속도가 증가함에 따라 레일 두부의 마모 깊이속도별로 큰 차이가 나지 않는 반면, 레일 게이지코너 부위의 마모는 속도가 증가함에 따라 증가한다.

참고문헌

1. T. Jendel, Prediction of wheel profile wear-comparisons with field measurements, *Wear*, 253, 89-99, 2002.
2. Telliskivi, T., Olofsson, U., Wheel-rail wear simulation. *Wear*, 257, 1145-1153, 2004.
3. Roger Enblom, Mats Berg, Simulation of railway wheel profile development due to wear—influence of disc braking and contact environment, *Wear*, 258, 1055-1063, 2005.
4. 이동형, 권석진, 서정원, 최하영, 유한요소법을 이용한 구름접촉마모 예측, 한국정밀공학회 2011년도 춘계 학술대회 논문집, 1549-1550, 2011.