

유한요소해석을 이용한
한국형 고속철도 차량의 차륜 마모 예측
The wheel wear prediction of a Korea High Speed Train
using a FE-analysis

최정흠*
Jeong Heum Choi

한동철**
Dong-Chul Han

김기환***
Ki-Hwan Kim

ABSTRACT

It is difficult to apply the Hertz theory to the wheel-rail contact problem which has the complicated geometric form and plastic deformation. Therefore, we perform the elastic-plastic FE analysis and compare the results with those of Hertz theory. Kalker's simplified theory of rolling contact is used to discretize the contact patches and calculate local traction and slip. The wear volumes are calculated using Archard wear equation.

1. 서론

열차가 안전하고 좋은 승차감으로 주행하기 위해서는 차륜 및 선로가 충분한 강도를 가져야 하며, 항상 양호한 상태로 유지 보수되지 않으면 안 된다. 그러나 정도는 파격하 차륜 하중과 다양한 기상작용 및 상대 운동에 의해 늘 마모, 파손을 받고 있는 것이 보통이다. 이러한 차륜 및 궤도의 손상에 대해서 신뢰성을 유지할 수 있는 방법을 고안하여 안전한 운행을 보장할 수 있도록 하는 기술을 제시하고 유지 관리하는 것이 필요하다.

이러한 유지 보수 작업에서 차량 운행 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 부분이 차륜과 레일의 마모, 손상 부분이다. 따라서 우리는 보다 안전하고 유지 보수에의 비용 절감 및 차량 전단의 기술 확보 측면에서 마모 및 손상에 대한 실질적이고 보다 정확한 해석의 필요성을 갖게 된다.

본 연구에서는 동력차, 동력 객차, 객차의 3량으로 구성된 한국형 고속철도 차량의 동력거동을 해석하고, 차륜 마모를 예측하였다. 다물체 동역학 해석을 통해 차륜과 레일 사이의 작용력과 접촉점 응력 도출하고 접촉 분체 해석을 통해 마모를 예측하였다. 접촉 분체는 Kalker의 simplified theory에 근거를 두고, Hertz contact theory와 유한요소 해석의 결과를 비교분석 하였다. 또한, 각 경우에 대해 Archard wear equation을 사용하여 차륜의 마모현상을 예측하였다.

* 서울대학교 장민기계설계공동연구소 선임연구원, 정희원

** 서울대학교 교수, 정희원

*** 한국철도기술연구원 수석, 정희원

2. 동적 거동 해석

2.1 차량 모델

한국형 고속전철(KSR350x)의 동력차, 동력격차, 궤차의 3량을 대상으로 동적거동 해석을 수행하였다. 해석 모델은 레일과 차륜(whheelset), 대차 (bogie frame)와 차체로 구성되며, 차륜과 대차사이에는 1차 현가장치로, 대차와 차체를 사이에는 2차 현가장치로 연결되어 있다.

차륜과 레일의 접촉력에 의해 추진되고 차륜의 탈연경사와 플랜지에 의하여 안내, 유도되면서 궤도상에 고정된 레일을 따라 주행하는 철도차량에 있어서 레일과 차륜의 상호 작용에 의한 힘은 대차로부터 차체에 전달되는 힘의 수준을 결정하는 기본이 된다. 그러므로 차륜과 레일의 형상 및 주행 궤도는 차량의 동역학적 거동에 중요한 영향을 끼치게 된다. 본 연구에서는 실제 한국형 고속전철에 사용된 차륜의 형상을 적용하였으며, 선로는 UIC60이 사용되었다. 해석에는 상용 다물체 동역학 해석 프로그램이 사용되었다.

2.2 주행 조건

차량이 200km/h의 일정한 속도로 곡선 및 곡선주행하는 2가지의 주행 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 정부고속철도 구간의 차도를 바탕으로 곡선 주로의 최소 곡선반경은 7km로 하였으며, 최외측의 바깥쪽 레일과 안쪽 레일 간의 수직 거리를 나타내는 엔드랴는 140mm 이다.

3. 접촉문제 해석

3.1 Hertz 이론과 유한요소 해석

두 물체의 접촉문제를 해석하기 위해서 일반적으로 사용되는 Hertz 방법은 접촉부에서의 해석적인 해의 도출 및 경향 파악이 상대적으로 간편하고, 인산시간에 장점을 보인다. 또한 상대적으로 차륜에 많은 마모가 발생하는 것을 기준으로 이를 잘 표현할 수 있다. 그러나 차륜과 레일의 접촉과 같이 작은 접촉 면적에 큰 수직 압력이 작용하는 경우 재로운 소성 거동을 할 수 있다. 또한 접촉 위치에 따라 복잡한 기하학적 형상을 갖는 차륜과 레일의 접촉 문제를 나타내는 때에는 Hertz 이론에 한계가 있을 수 밖에 없다.

따라서 본 연구에서는 접촉점의 위치에 따른 기하학적 형상과 재료가 탄소성 변형을 고려한 유한요소 해석을 수행하고 그에 따른 접촉면과 접촉 압력의 변화를 Hertz 이론과 비교하였다.

3.2 유한요소 해석 모델

차륜과 레일간의 접촉문제 해석을 위해 3차원 유한요소 모델을 사용하였다. 한국형 고속전철의 차륜과 UIC60 레일로 구성된 접촉문제 해석 모델은 그림 1과 같으며, 해석 시간의 단축과 효율성을 위해 실제 해석에서는 적절한 경계조건과 함께 차륜의 일부분만을 사용하였다.

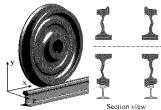


그림 1. Wheel/Rail contact model for FE analysis

직선 주철과 곡선 주철에 따른 차동과 레일간의 접촉점의 위치와 수직 하중은 도표 1에 나타나며 이와 같이 통계 검증해서 결과를 이용하였다. 도표 2에는 차동과 레일의 물성치를 나타내었다. 모두 하중 처리된 상태가 사용되기 때문에 양쪽 용어의 변형 용리 2배이상 높은 480-600 MPa에 이른다.

해석에는 ABAQUS/Standard ver. 6.3을 사용하였으며, 서울대학교 공과대학에 구축된 클러스터 시스템에서 약 8시간의 해석시간이 소요되었다.

도표 1. Simulation data for FE analysis

Wheel-Rail model	Contact position		
	Straight	Curved left	Curved right
No. of elements	38,700	38,700	38,700
No. of nodes	35,400	35,400	35,400
Contact tolerances	0.01	0.01	0.01
Coeff. of friction	0.25	0.25	0.25
Axle loading	7.800	7.140	8.000

도표 2. Material properties of Wheel and Rail

Material properties	Numerical values	
	Wheel	Rail
Young's modulus E (Pa)	2.1×10^{11}	2.1×10^{11}
Poisson's ratio ν	0.3	0.3
Mass density ρ (kg/m ³)	7,800	7,800
Yield strength σ_y (Pa)	6.8×10^8	4.8×10^8

3.3 유한요소 해석 결과

직선과 곡선 주철시의 차동과 레일 접촉에 대한 유한요소 해석결과를 도표 3에 정리하였다. 그림 2에서 보기를 공부하기에는 차동 접촉 부근에서 발생하는 최대 응력(Max. stress)이 재료의 양쪽 용력을 넘어서는 것을 확인할 수 있다.

또한 그림 3과 4에서 나타난 접촉점의 형상에서도 Hertz 이론의 원천된 타원형은 차이를 보인다. 특히 접촉면이 차동과 관련된 및 레일 개기의 부근에서 한쌍의 곡선주철이 바깥쪽 레일(Curved left)의 경우 두 쌍형태 있어서 정파와 사이파 두쌍형태 발생함을 볼 수 있다.

도표 3. Result of FE analysis

Analysis result	Contact position		
	Straight	Curved left	Curved right
Max. Min. Stress(Mpa) (Wheel-Rail)	627.9490	820.6819	668.981
Max. Contact Pressure(Mpa) (FE analysis)	847	1386	974
Max. Contact Pressure(Mpa) (Hertz theory)	1064	1893	1114



그림 2. Mises Stress distribution



그림 3. Contact pressure distribution

그림 5와 6에는 직선과 곡선 주철시의 원형 방향에 대한 접촉 압력 분포를, 그림 7에는 레일의 곡률형에 대한 접촉 압력 분포를 나타내었다. 최대 접촉압력은 직선 및 곡선주철에서 유한요소해석 결과와 Hertz 방법에 의한 결과보다 각각 12%, 17% 증가한 것을 확인할 수 있다. Hertz 이론과 비교한 때 유한요소 해석 결과로 원형적인 접촉압력 분포는 상대적으로 낮아지고, 접촉 면적은 증가하였다.

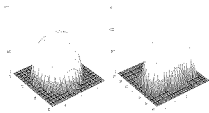


그림 4. Contact pressure distribution (Straight & Curved_left)

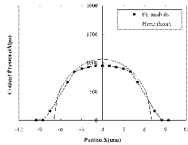


그림 5. Contact pressure distribution of longitudinal direction (Straight)

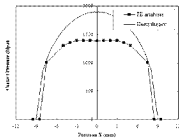


그림 6. Contact pressure distribution of longitudinal direction (Curved_left)

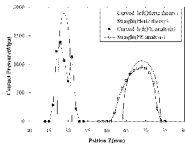


그림 7. Contact pressure distribution of lateral direction (Straight & Curved_left)

4. 마모 해석

4.1 접촉/슬립

동적 기동 해석과 Kalker의 Simplified Theory에 의해 차륜과 레일의 접촉면과 위치에 작용하는 하중과 traction에 대한 정보를 얻었으며, 차륜과 레일의 접촉면 형상 및 압력 분포는 유한요소 해석을 통하여 구하였다.

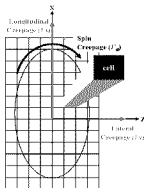


그림 8. Local Contact Analysis

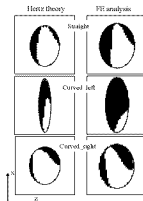


그림 9. stick/slip area on contact patch

마모 해석을 위해 그림 8과 같이 타원형의 접촉면을 동일한 크기의 격자로 이산화 하였다. 접촉해석을 통하여 접촉의 leading edge에서 뒤쪽까지 연속적으로 각 격자에서의 traction, 압력,

슬립을 계산한다. 각 cell에서 결정된 힘은 미끄럼과 구름 운동의 정의에 따라 각 요소에 작용하는 전단력이 수평 작용력 보다 작은 경우 접촉 영역에서 접촉 현상이 발생하게 되며, 마찰력과 전단력이 동일한 크기를 가지게 될 때 미끄럼 운동이 발생하게 됨을 판단의 근거로 접촉/슬립 영역 인지 판별되며, 미끄럼 영역에서 슬립의 크기와 방향이 결정된다. 이러한 과정은 Kalker의 FASTSIM 알고리즘과 유사하다.

직선 및 곡선주로의 각 경우에 차륜과 레일의 접촉면에서의 슬립 영역은 그림 9와 같다. 유한 요소 해석 결과를 바탕으로 접촉문제 해석을 수행하여 얻은 슬립 영역은 Hertz 이론과 비교할 때, 전체적으로 증가하였음을 볼 수 있다.

4.2 마모 예측

본 연구에서는 차륜과 레일 사이의 여러 가지 마모 메커니즘 중 차륜과 레일 사이에 미끄럼 마모에 주된 영향을 미치는 연삭과 응착에 대한 해석을 통하여 접촉면에서 발생하는 마모량을 예측하였다.

접촉문제 해석을 통하여 구분된 미끄럼 영역의 각 요소에서의 미끄럼 속도는 아래와 같다.

$$\overline{v_{slip}} = V_{vehicle} \left[\frac{v_x - v_y \beta}{v_y + v_\phi x} - \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} \right]$$

여기서 v_x 는 종방향 크리피지, v_y 는 횡방향 크리피지, v_ϕ 는 스핀 크리피지이며, 탄성변형에 의한 상대속도항은 0로 간주한다.

각 요소별 미끄럼 속도를 이용하여 요소별 미끄럼 거리를 계산하면,

$$S = \sqrt{|v_{slip}|} \frac{\Delta x}{V_{vehicle}}$$

위에서 구한 값들을 이용하여 Archard wear equation을 사용하여 각 단위 요소별 마모량을 구하며, 접촉면적 전체에 대하여 요소별 마모량을 적분하면 총 1회 접촉당 마모량을 얻는다.

$$\Delta V = K \frac{|s| p}{H}$$

여기서 K 는 마모계수이며, H 는 경도, p 는 압력이다.

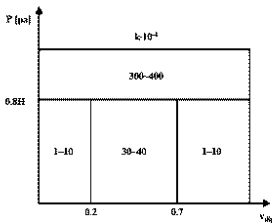


그림 10. Wear coefficient map (Wheel:UIC900A, Rail:UIC60)

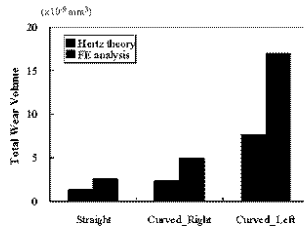


그림 11. Total wear volume 결론

위 식에 사용된 마모계수 K 는 외부 환경과 운행 조건에 따라 크게 영향을 받으므로 실험실 시험과 현장 측정을 통하여 현실적으로 값의 범위가 결정되고 조정되어야 하지만, 한국형 고속철도 차량의 경우 시험 운행 기간과 구간이 한정되어 있으므로 신뢰할만한 현장 측정 및 실험 결과를 얻지 못한 단계이므로, 유사한 체로 수행되었던 선형연구 자료를 이용하였으며, 그림 10과 같다.

유한요소 해석을 통해 얻은 차륜 및 레일의 접촉 압력은 Hertz 이론과 비교하여 접촉면에서 상대적으로 낮은 압력이 넓은 면적에 분포하고 있어 그림 11과 같이 접촉문제 해석을 통해 미끄럼 운동을 하는 영역으로 판단되는 즉, 마모가 발생하는 격자가 많아짐에 따라 전체적인 마모량이 증

가한다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 200km/h의 속도로 주행하는 한국형 고속철도 차량모델의 동적거동 해석을 수행하여 마모예측을 위해 필요한 파라미터를 산출하였고, 유한 요소 해석을 통한 차륜과 레일간의 접촉위치에 따른 접촉현상을 파악함으로써 마모해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 200km/h로 주행하는 한국형 고속전철의 동적거동 해석 결과, 곡선 주행시 안쪽레일은 레일 헤드 중앙을 기준으로 좌측 3mm 지점에서 접촉하고, 바깥쪽 레일은 좌측으로 12mm 지점에서 접촉함을 알 수 있었다.

(2) 차륜과 레일의 접촉에 대한 유한요소 해석 결과, 직선 및 곡선주행시 차륜이 레일의 헤드부에서 접촉하는 경우 Hertz 이론에 의한 접촉압력이 각각 12%, 17%의 차이를 보였으며 압력분포 및 형상은 유한 요소 해석결과와 유사하나, 곡선 주행시 차륜의 플랜지와 레일 게이지 부근에서 접촉하는 안쪽 휠의 경우에는 최대 접촉압력이 36%의 차이를 보였으며 접촉면의 형상도 큰 차이를 보였다.

(3) 동적 거동 해석 및 유한요소 해석 결과로부터 Archard Eq.에 의한 마모량을 계산해 본 결과, 유한요소 해석과 Hertz 이론을s 이용하여 구한 마모량의 차이가 직선주행시 46.9%, 곡선 주행시에는 51.3%, 55.1%로 전체적으로 탄소성 유한요소 해석을 이용한 경우 Hertz 이론과 비교하여 마모량이 증가한다는 것을 확인하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. J.J. Kalker(2000), "Rolling Contact Phenomena: Linear Elasticity", Applied Mathematical Analysis Reports, pp.34-48, 2000.
2. Kalker J. J.(1967), "on the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction", Ph.D. Thesis
3. Archard J. F.(1953), "Contact and rubbing of flat surfaces", Journal of Applied Physics" Vol. 24, pp. 981-988
4. Kalker J. J.(1953), "A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact", Vehicle System Dynamics, Vol. 11, pp. 1-13.
5. Olofsson U., Telliskivi T.(2003.), "Wear, friction and plastic deformation of two rail steels-Full scale test and laboratory study", Wear, Vol. 254, pp. 80-93
6. Tanel T., "Simulation of Wear in a Rolling -Sliding Contact by a Semi-Wrinkler Model and the Archard's Wear Law"
7. 박찬경, 김영국, 배대성, 박태원(2001), "경부고속철도 시험선 구간에서 G7 고속전철 차량의 동특성 검토", 한국철도학회 논문집, 제 4권, 제 4호, pp. 131-137
8. Tomas Jendel(2002), "Prediction of Wheel profile wear-comparisons with field measurements", Wear, vol. 253, pp. 89-99