

차륜담면의 형상변화에 의한 접촉응력분포 해석

Contact Stress Analysis on the Variation of Wheel Profile

김의석* 허현무** 윤춘한***
 Kim, Eui-Seok Hur, Hyun-Moo Yun, Chun-Han

ABSTRACT

Mechanical force acted on the rail wheel causes excessive wear and increases the maintenance cost. The present paper proposes newly designed wheel profiles in order to reduce the contact stress. Numerical analysis on the stress distribution of wheel-rail contact stress is carried out using ABAQUS, a commercial finite element code. The result of KNRI/40 conical wheel is compared to those of the proposed wheels, all of which are arc wheel profile type.

1. 서론

유지보수비용을 줄이고 열차의 승차감과 주행안정성을 향상시키기 위하여 차륜과 레일의 접촉문제가 최근 다시 주목받고 있다. 철도차량은 차륜과 레일 간의 마찰력을 이용하여 주행하므로 필연적으로 양쪽에 마모가 발생한다. 특히 급곡선에서는 외측 레일의 게이지 코너부에서 차륜 플랜지와 레일에 큰 마찰력이 발생하기 때문에 이 접촉부가 크게 마모된다(Fig.1). 이들의 마모가 차량과 레일의 보수비를 증대시키는 요인이 되므로 마모현상을 조사하여 마모를 줄이는 방안이 필요하다.

일반적으로 차륜 담면은 원추형, 원호형으로 나뉘어지는데, 이 중에서 원추형과 원호형이 실제로 많이 사용되고 있다. 원추형 담면은 직선 구간에서의 복원 기능이 우수한 반면, 원호형은 곡선 구간에서의 조향 성능이 뛰어난 것이 특징이다. 본 연구에서는 국내에서 사용되는 KNR 원추형 1/40 담면의 직립 마모를 개선하기 위하여 접촉응력분포에 대한 해석을 수행하였다. 또한 이를 기초로 하여 몇 가지 원호형 담면형상안을 제안하고 원추형 담면의 해석 결과와 비교하였다(Fig.2~Fig.6)

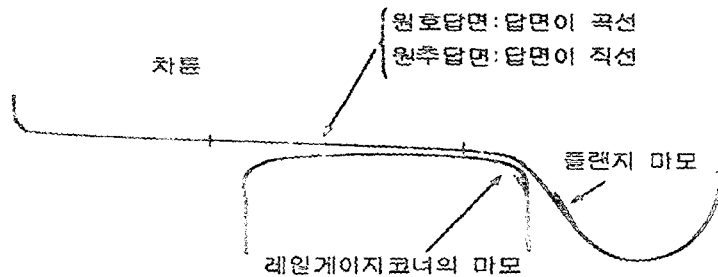


Fig.1 차륜/레일 접촉형상

* 에스브이디(주) 팀장, 비회원
 ** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
 *** 한국철도기술연구원 위촉연구원, 비회원

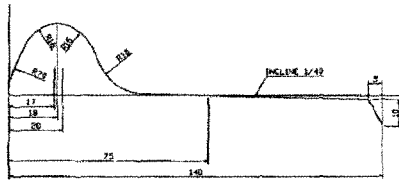


Fig.2 답면형상안(KNR 1/40)

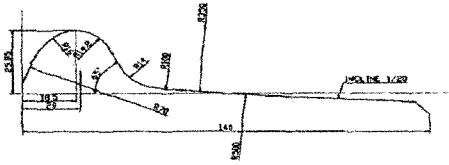


Fig.3 답면형상안(New1)

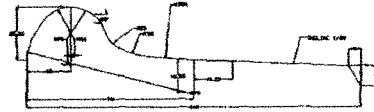


Fig.4 답면형상안(New2)

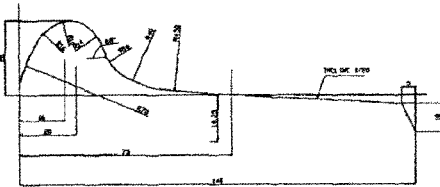


Fig.5 답면형상안(New3)

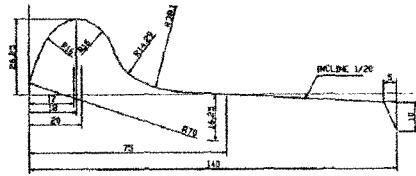


Fig.6 답면형상안(New4)

2. 차륜의 하중 및 횡방향 변위 해석

차량이 곡선구간을 통과할 때에는 원심력에 의하여 양측 차륜이 외측 궤도쪽으로 미끄러지며 외측 차륜은 레일과 플랜지 접촉을 하게 된다. 본 연구에서는 곡선 구간에서 차륜에 가해지는 하중 및 횡방향 변위를 해석을 통하여 산정하였으며 이를 유한요소해석에 반영하였다. 해석차량은 국내 대표적 여객차량인 무궁화객차를 대상으로 하였으며, 궤도는 궤도틀림이 없는 직선궤도와 곡선반경 R400인

표1 곡선구간에서의 하중 및 횡방향 변위 해석결과

구분	횡방향 변위 (mm)	수직하중 (kN)	수평하중 (kN)
KNR 1/40	5.86	35.7	21.2
New1	6.51	36.0	18.4
New2	6.32	35.8	17.0
New3	5.00	38.0	15.0
New4	7.74	36.2	14.3

경우의 곡선구간으로 이상화하여 해석하였다. 직선구간이 경우 모든 차륜에 가해지는 수직하중은 48.1 kN이며, 곡선반경 400m의 곡선 구간의 경우 표1과 같이 외측 차륜에 가해지는 수직하중과 수평하중 해석결과를 산출하였다. Fig.7과 Fig.8은 곡선구간 통과시의 수직 및 수평하중 해석결과를 나타낸 선도이다.

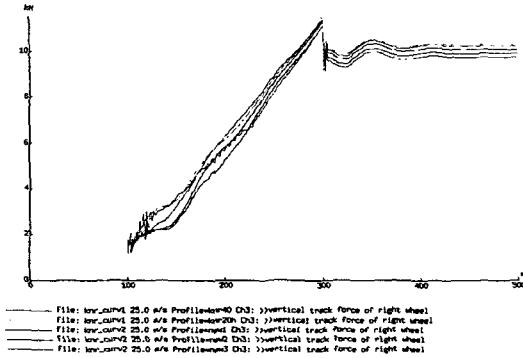


Fig.7 곡선통과시 수직하중 해석결과

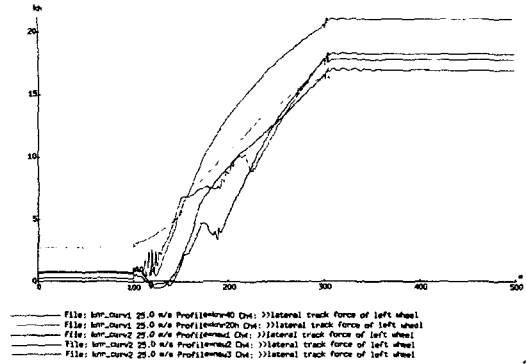


Fig.8 곡선통과시 횡하중 해석결과

3. 유한요소 해석

차륜과 레일의 접촉은 접촉 부위에서의 국부적인 응력이 구배가 심하므로 이 부위에서 요소를 세밀하게 구성해야 한다. 접촉 현상은 본질적으로 3차원이지만, 해석 모델을 3차원으로 하면서 국부적인 접촉 현상을 정확하게 기술하려면 계산 시간이 과다하게 소요되는 단점이 있다. 본 연구의 목적은 기존의 원추형 차륜담면형상을 개선하기 위한 원호형 담면을 개발하는 것이므로 2차원 모델로도 각 차륜담면의 비교 목적으로는 의미있는 결과를 얻을 수 있다고 판단하여 2차원 해석을 수행하였다.

Fig.9에 유한요소해석 모델을 나타내었다. 요소는 8절점 사각형 요소를 사용하였으며 요소의 개수는 약 11,000개, 절점이 개수는 약 36,000개이다. 접촉 부위에서의 요소의 크기는 약 0.5mm이다. 또한 표2에 해석에 사용된 차륜과 레일이 물성치를 나타내었다. 차륜과 레일 사이의 마찰계수는 김청균 등⁴¹⁾의 연구를 참고로 하여 0.25로 하였으며 하중은 직선구간에서 수직하중 48.1kN, 곡선구간에서는 표1에 나타낸 해석결과로 하였다. 해석은 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다.

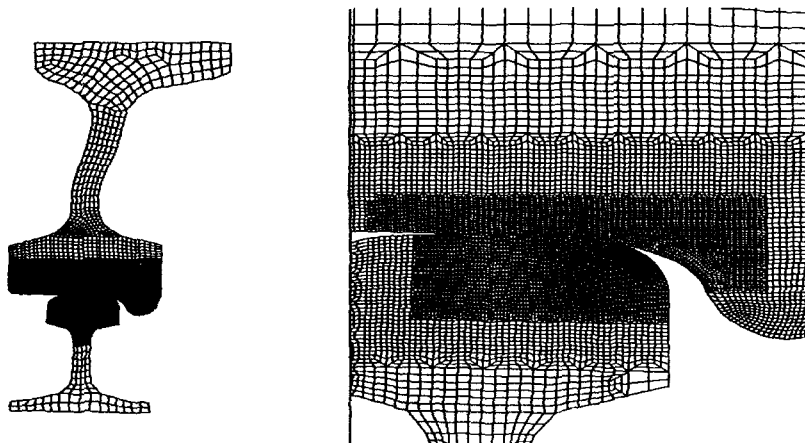


Fig.9 유한요소 모델

Fig.10~11에 KNR 1/40 원추형 담면에 대한 응력 분포를 나타내었다. 직선구간의 경우 Hertz의 접촉이론에 의한 결과와 유사한 반면 플랜지 접촉이 발생하는 곡선구간의 경우 차륜의 응력분포는 좀 더 복잡한 양상을 보인다. Fig.12~13은 New4형의 원호형 담면에 대한 결과로서 그 경향은 원추형 담면과 유사하다.

표3과 표4에는 각각 차륜과 레일에 발생하는 최대 Mises 응력을 나타내었다. 전체적인 경향은 곡선구간에서 응력이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 곡선구간에서는 반경이 작은 레일의 원호와 차륜의 플랜지가 접촉하게 되므로 직선구간에 비하여 상대적으로 접촉면적이 작아지기 때문이다.

또한 KNR 1/40 원추형 담면의 경우 직선구간과 곡선구간에서의 최대응력값의 차이가 심한 반면 원호형 담면은 그 차이가 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다. 원호형 담면은 여러 개의 원호로 구성된 담면이므로 직선구간이나 곡선구간이나 원호 대 원호의 접촉이 발생하는 반면, 원추형 담면은 직선구간에서는 원호 대 직선, 곡선구간에서는 원호 대 원호의 접촉이 발생하기 때문이다. 또한, 직선구간에서 기존 원추형담면의 응력값이 적게 발생하는 것은 직선구간에서 차륜/레일 접촉시 접촉점 위치에 의하여 접촉면적이 크게 발생함에 기인한 것이라 할 수 있다. 특히 4가지의 원호형 담면 설계안 중에서도 New4의 담면은 곡선구간에서 낮은 응력값을 보여 플랜지 마모에 대해 우수한 성능을 보일 것으로 예측된다.

표2 차륜 및 레일의 물성치

물성치	차륜	레일
Young's Modulus (GPa)	210	210
Poisson's Ratio	0.3	0.3
Yield Stress (MPa)	880	880

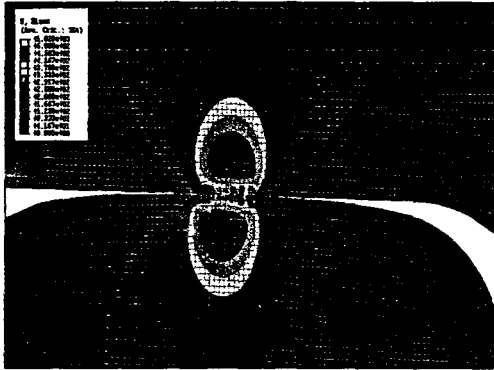


Fig.10 직선구간 응력분포(KNR 1/40)

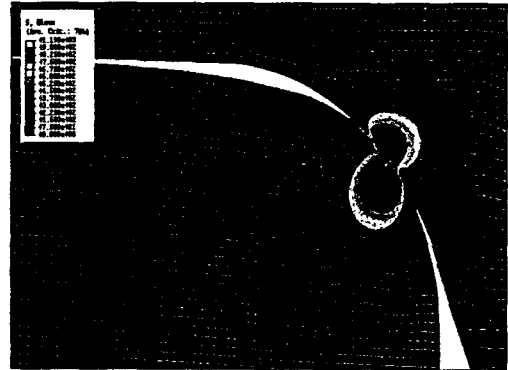


Fig.11 곡선구간 응력분포(KNR 1/40)

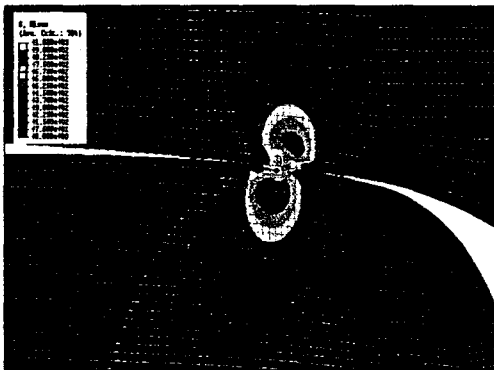


Fig.12 직선구간 응력분포(New4)

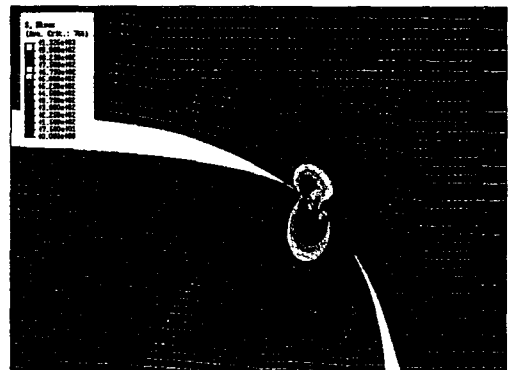


Fig.13 곡선구간 응력분포(New4)

표3 차륜의 최대 Mises응력(MPa)

구 분	직선 구간	곡선 구간
KNR 1/40	758.0	999.7
New1	914.5	1,138
New2	928.7	992.2
New3	853.2	1,075
New4	904.6	903.6

표4 레일의 최대 Mises응력(MPa)

구 분	직선 구간	곡선 구간
KNR 1/40	599.9	1,027
New1	901.3	1,165
New2	883.3	1,060
New3	512.8	1,060
New4	899.4	976.6

4. 결 론

차륜의 마모는 그 양상이 매우 복잡하며 마모의 요인도 다양하다. 마모를 줄이기 위한 방안은 여러 가지가 있으나 대표적인 것으로는 차륜 및 레일의 재질 변경, 윤활, 담면형상 최적화 등이 제시되고 있다. 차륜담면형상 개선측면에서 차륜과 레일의 접촉시 접촉점에서의 접촉면압을 감소시키는 방안도 마모를 저감하기 위한 방안이라 할 수 있다.

본 연구에서는 기존의 원추형 담면의 직립마모 현상을 개선하기 위하여 새로운 원호형 담면을 제안하여 응력분포해석을 수행하였다. 해석결과 제안된 원호형 담면형상이 기존 원추형 담면형상에 비하여 전반적으로 곡선구간에서 응력분포가 저감될 것으로 예측됨을 알 수 있다. 특히 담면형상중 New4에 대한 응력분포는 가장 양호한 특성을 보여 곡선구간 통과시 레일과의 적응성측면에서 양호한 결과가 기대된다.

그러나, 본 연구결과는 차륜/레일간의 응력분포측면에 국한된 결과로서 고속에서의 주행안정성, 급곡선에서의 탈선에 대한 안전성 측면에서도 검토되어야 할 것이며, 실차량 적용에 의한 장기간의 운용시험을 통하여 추후 검증되어야 할 것이라 사료된다.

참고문헌

1. L. Ramanan, R. Krishna Kumar, R. Sriraman(1999), "Thermo-mechanical Finite Element Analysis of a Rail Wheel", International Journal of Mechanical Science, 41, pp.487-505
2. 성기득, 양원호, 조명래, 허성필(1999), "철도차량용 휠과 레일의 형상설계에 관한 연구", 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제11호, pp.2033~2039
3. 성기득, 양원호, 조명래, 김철(2000), "철도차량용 휠과 레일의 접촉특성 및 응력해석", 한국자동차공학회논문집, 제8권, 제5호, pp.148~156
4. 김청균, 김기환(1997), "고속전철용 레일-휠 접촉에서 응력분포에 관한 유한요소해석", 한국윤활학회지, 제13권, 제3호, pp.93~101
5. "차륜담면 최적관리시스템 개발", 한국철도기술연구원, 2002