

60kg급 레일 두부형상 개선 기술검토

Technical Investigation of Rail(60kg) Head Profile

정우진* 양신추**
W. J. Chung S. C. Yang

ABSTRACT

Now, Korea National Railroad is planning many ways to increase the maximum operating speed of train up to 200km/h by 2010. Among those ways, connecting conventional line with the KTX is the strongest alternative. Mostly, conventional lines are consisting of both KS50N and KS60 rail. However, the excessive abrasion might be occurred between wheel and rail when the KTX designed to operate on UIC60 is operating on the conventional line. On this study, new standard of 60kg-class rail considered suitability for both KTX and wheel used in conventional line is presented. It seems to be an effective solution for increasing maintenance costs expected when commercial speed of conventional line is increasing

1. 서론

철도청은 「21세기 국가철도망 구축 기본계획」을 수립하고 낙후된 간선 철도망을 대대적으로 개량함과 동시에 고속전철의 기존선 연계운행을 계획하여 전체적인 철도시스템의 효율화를 도모하고 있다.

이번 기존철도시설 개량사업에 있어 우선적으로 고려되어야 하는 것은 크게 두 가지로 요약될 수 있는데 첫 번째는 전용 고속선이 아닌 일반 기존선에 고속전철이 투입되었을 경우에도 차량의 주행안전성 및 승차감이 일정수준 이상으로 확보될 수 있어야 한다는 점이며 두 번째 측면은 차량과 궤도 양측의 유지보수비 최소화가 항상 전제되어야 한다는 점이다.

현재 세계의 모든 고속전철은 60kg급 레일을 기준으로 설계되어 있다. 그러므로 국철 역시 고속전철과의 인터페이스를 기존선에서 원활히 하기 위해서는 지금의 50kg급 위주의 선로를 점차 60kg급 중형레일로 바꾸어 가야할 필요가 있다. 중형레일이 사용되면 레일 단면 계수가 약 45% 정도 증가하기 때문에 궤도의 안전성이 향상되고, 전기저항 감소에 의한 전력손실과 레일의 피로 응력 및 손상률을 줄일 수 있다. 즉 이것은 유지보수성이 향상된다는 것을 의미한다. 이 밖에도 레일 처짐량 감소에 따른 승차감 향상과 체결구를 비롯한 부속품들의 고장을 감소와 같은 여러 가지 부수적 효과를 얻을 수 있다. 프랑스 연구진에 따르면 60kg급 레일은 비슷한 조건에서 사용된 50kg급 레일에 비하여 사용수명이 약 10년 정도 더 긴 것으로 조사되었다. 따라서 부설 비용면에서 초기에 50kg급 레일이 60kg급 레일에 비하여 불리하더라도 향후 교환 및 보수주기를 고려한다

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

면 장기적으로 더 큰 경제적 효과를 가져올 수 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 상술한 점들을 감안하여 기존 차량들과 고속전철 모두에 적합한 60kg급 신형 레일규격을 제정하는 것에 그 목적을 두고 있다. 이를 위해 여기서는 정우진⁽¹⁾ 등에 의하여 발표된 기존의 연구결과를 소개하고 이 후 진행된 연구결과를 추가로 검토함으로써 신형 레일의 효용성에 대하여 설명하고자 하였다.

2. 기존 검토사항

현재 국철에서는 교량, 터널 등의 취약개소 및 일부 구간에 KS60 레일을 부설하고 있으나 대부분의 일반구간은 KS50N 레일을 주로 사용하고 있다. KS60과 KS50N레일은 국철구간에서 무리없이 운용되어지고 있는 것들로서 운영상의 경험에 의해 현 시스템을 기준으로 현용 차량형상과의 적합성이 어느 정도 규명되어졌다고 볼 수 있다. 철도청은 기존의 궤간을 유지시키기 위해 새로 제정될 레일의 두부폭도 기존의 것과 같게 유지시킬 방침이며 두부형상도 기 검토된 이들 형상 중 하나를 선택하여 적용시킬 예정이다. 이런 제한들은 최적의 레일형상을 찾는 데 방해가 될 수도 있으나 현실적인 사정을 고려할 때 불가피한 측면이 더 크다. 본 연구에서는 두 개의 형상 중 보다 우수한 레일형상을 가려내기 위해 범용성을 가장 중요한 선택기준으로 삼았다.

2.1 차량-레일 정적 적합성 검토⁽²⁾

현용 차량형상을 제외하고 기존선에서 운행될 가능성이 높은 것이 KTX차량형상이다. 몇 년 뒤 고속전철 개통과 함께 연계운행이 시작되겠으나, 아직 기존선의 레일두부형상과 KTX 차량과의 적합성 검토는 충분히 수행되지 못한 상태이다. 따라서 새로 제정될 레일의 두부형상 결정과정에서 두 기존 레일들과 KTX차량과의 적합성 해석을 수행하고 그 결과를 최종 선택에 반영한다면 합리적인 결론을 얻을 수 있을 것이라고 판단하였다.

두 형상(차량/레일)간 간섭면적과 최초 간섭시기를 살펴보는 것으로 정적검토가 수행되었다. 즉, 차량을 수평으로 이동시킬 때 발생하는 간섭면적이 작거나 간섭발생 시기가 느린 것이 상대적으로 정적 적합성이 우수한 것으로 간주하였다.

검토결과 UIC60과 게이저 코너부의 형상이 동일한 KS50N레일이 KS60레일보다 KTX차량과의 간섭효과가 상대적으로 적은 것을 알 수 있었다. 이 결과는 정적해석 측면에서는 KS50N레일이 근소하나마 KS60보다 우수할 가능성이 크다는 것을 나타낸다.

2.2 차량-레일 동적 적합성 검토

차량과 레일의 형상의 변화는 차량의 동특성 변화에도 밀접하게 관계되므로 이에 대한 검토도 동시에 수행되어야 한다. 국내에서 운용되고 있는 대표적 차량들(KT23, NT21 대차사용 무궁화 차량 및 KTX차량)을 선정하여 곡선부를 통과하는 차량의 동특성 변화를 전문 해석 프로그램으로 예측하였다.

차량모델에서는 1/40형, 1/20 Heuman형 그리고 KTX 차량에 사용된 차량형상 등 총 3가지가 사용되었다. 이 중 고속전철에 사용되는 차량형상은 오직 KTX 차량에만 적용되었고 나머지 2가지 형상은 KT23과 NT21 대차 모두에 적용되는 것으로 가정하였다. 레일은 KS50N과 KS60레일 형상이 상기한 3가지 차량 종류에 모두 적용되는 것으로 가정되었다.

수치해석 결과를 통해 각 경우에 대한 좌우측의 윤중감소량과 탈선계수들을 구하였다. 각각의 조건들이 변함에 따라 어떤 주목할 변화가 있는지 관찰하기 위하여 해석 결과 중 최고치들을 뽑아 그 값을 비교하여 보았다. 검토결과, 레일의 두부형상이 바뀌어도 차량 동특성에 주목할 만큼의 변화는 발생되지 않았다. 정확한 결과는 반복 실차 실험과 장기적 관찰을 통해서만 도출될 수 있을 것이다. 그러나 차선책으로 수행된 수치해석 결과가 일관되게 나오므로 KS50N과 KS60레일

정도의 형상변화로서는 차륜 안전성에 영향을 줄 정도의 변화는 발생되지 않을 것이라는 사실을 간접적으로 유추할 수 있다.

2.3 레일 구조해석

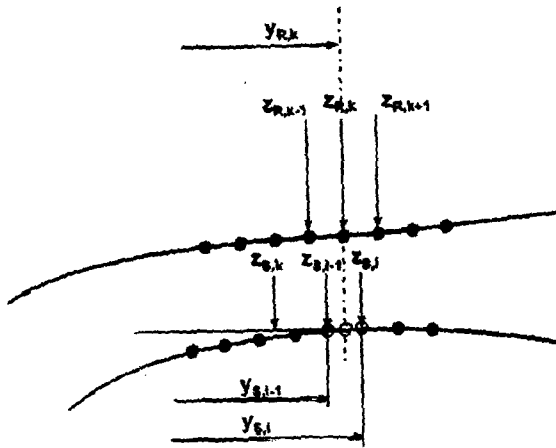
차량이 200km/h로 주행할 때 레일, 침목 그리고 노반에 가해지는 압력들을 수치해석을 통해 검토하였다. 해석결과, KS50N레일에 비하여 KS60레일이 월등한 성능우위를 보였다. 이것은 KS60레일의 단면계수가 KS50N 레일에 비하여 약 45%정도 크기 때문이며 유지보수성에서 60kg급 레일이 우수한 성능을 보이는 중요한 이유가 된다.

3. 접촉점 해석검토

차륜과 레일의 접촉점 분포에 따라 차륜과 레일의 선택목적은 달라지게 된다. 만일 차륜 담면부와 레일 두부면에 걸쳐 접촉점이 넓고 고르게 존재한다면 이는 저속 및 곡선부 운행에 적합한 조합일 것이며 차륜과 레일의 두정부에 집중적으로 접촉점 분포가 존재한 경우라면 고속 및 직선 운행에 보다 적합한 조합일 것이다. 차륜과 레일의 접촉점은 각각의 기하학적인 특성과 하중량 그리고 운동방향에 따라 결정된다. 그러나 아직 국내에서는 차륜과 레일규격의 조합을 결정할 때 이들 해석을 적절히 활용하지 못하고 있으며 규격이 도입된 국가가 제공하는 실험결과나 문헌 등에 전적으로 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 본 연구원에서 개발한 강체 접촉점 해석 프로그램과 탄성체 접촉 프로그램을 이용하여 국내에서 운용되고 있는 차륜과 레일들의 조합에 대한 적합성을 관찰하여 보았다.

3.1 강체 접촉점 해석



(가) 해석이론⁽³⁾

휠/레일의 contact의 위치는 레일과 차륜의 형상, 레일의 계간, 레일의 경사각과 축과 차륜의 틈새(clearance)의 영향을 직접적으로 받는다. 휠과 레일은 강체로서 접촉점(Contact point)에서의 재료의 변형이 없다면, 좌표로부터 최소점을 찾을 수 있고, 이는 최초의 접촉점으로 가정되고 이때 접촉은 한점 접촉으로 가정한다. 함수로 표현한 휠/레일의 형상으로부터 윤축의 횡적인 이동 y에 따라서 먼저 z함수를 비교하여 최소점인 접촉점(z_{y,min})을 구하고 레일은 보간법에 의하여 구한다(그림 1). 이러한 방법으로 횡방향으로 0.5mm의 이동시마다 접촉점을 찾을 수 있다.

(나) 해석결과

전술한 접촉해석 프로그램을 이용하여 차륜과 레일의 접촉점 해석을 수행하여 보았다. 차륜과 레일의 조합결과는 다음의 그림들과 같다. 본 해석의 장점은 비교적 간단하게 차륜과 레

$$z_{s,k} = z_{s,i} - \frac{(y_{r,k} - y_{s,i})(z_{s,i} - z_{s,i+1})}{y_{s,i} - y_{s,i-1}}$$

그림 1. Contact point on profile

일간의 접촉점 변화경향을 파악할 수 있다는 것이다. 그러나 실제 접촉시에 발생하는 접촉면의 찌그러짐 현상을 고려할 수 없다는 단점도 가지고 있어 이 해석만을 가지고 전체 경향을 판단하는 것은 무리가 될 수 있다.

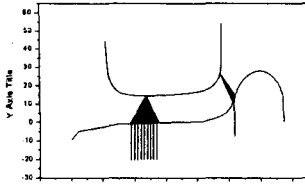


그림 2. KTX-UIC

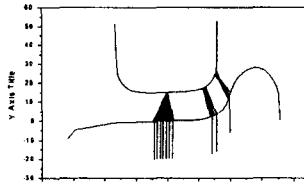


그림 3. KTX-KS50N

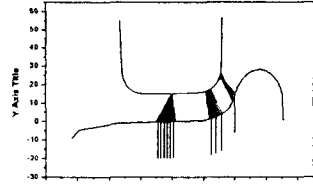


그림 4. KTX-KS60

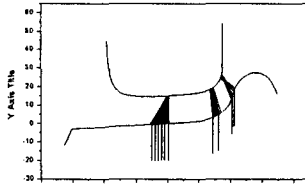


그림 5. Heuman-UIC60

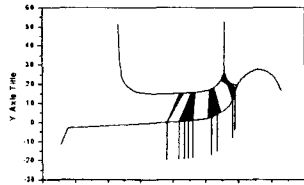


그림 6. Heuman-KS50N

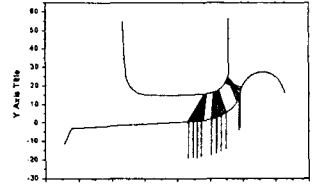


그림 7. Heuman-KS60

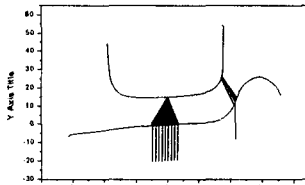


그림 8. 20Normal-UIC60

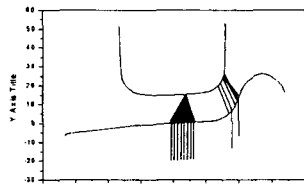


그림 9. 20Normal-KS50N

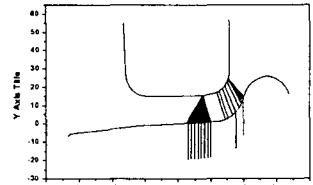


그림 10. 20Normal-KS60

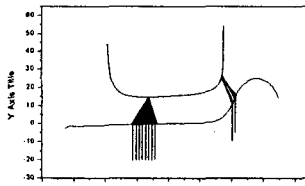


그림 11. 40Normal-UIC60

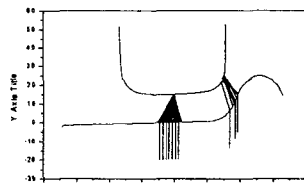


그림 12. 40Normal-KS50N

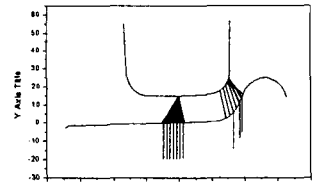


그림 13. 40Normal-KS60

그림 2 ~ 13은 강제 접촉점 해석으로 차륜-레일 조합들의 접촉점 변화를 예측한 결과이다. 해석결과 차륜과 레일간의 접촉점 변화 pattern은 레일보다는 차륜의 형상에 더 많이 의존한다는 사실을 알 수 있었다. 다만 UIC60과 조합이 된 대부분의 경우에서, 답면 접촉 group과 플렌지 접촉 group 사이의 간격이 크게 분리되는 경향을 보이는데 이것은 UIC60의 캔트량이 1/20으로 설정되었기 때문인 것으로 사료된다.

UIC60 레일의 경우 KTX차륜과 조합을 이룰 때 다른 형상들에 비하여 답면 접촉 group과 플렌지 접촉 group 사이의 간격이 가장 벌어진다. 이것은 KTX 차륜이 직선 및 고속주행에 맞추어 설계된 형상이라는 것을 반영한다. 따라서 곡선이 많은 기존선에 이 조합이 적용된다면 갑작스러운 접촉점 이동이 빈번히 이루어져 차량 안정성 및 승차감을 악화시킬 수 있을 것이다.

KS50N과 KS60레일의 경우 레일의 형상에 따라 접촉점 pattern이 결정되기보다는 차륜의 형상에 따라 접촉점 group이 형성되는 경향을 보였다. 특히하게 Heuman 차륜은 레일의 종류와 상관없이 매우 넓은 영역에서 접촉점이 형성되었다. 이것은 Heuman 차륜형상이 원활한 곡선주행을 목적으로 설계되었으며 주행 중 차륜과 레일 사이에 지속적인 1점 접촉이 보장되도록 조정되었다는 것을 말해준다. 답면 접촉 group이 플렌지 접촉 group과 근접하게 형성된다는 것은 곡선주행 시에도 접촉점의 이동이 자연스럽게 이루어져 승차감을 해치지 않게 해줄 수 있다는 것을 의미한다. 이것을 역으로 말하자면 직선주행시에는 약간의 횡진동에 의하여서도 플렌지 접촉이 발생할 수 있다는 것이다. 20 normal 차륜형상은 화차에 많이 적용되는 규격으로서 KS50N과 KS60레일과의 조합에서 접촉 group이 플렌지 부근에 집중되는 것을 볼 수 있다. 이는 화차의 flange back

거리(화차:1,352 객차:1,356mm)가 객차에 비하여 짧고 차륜 답면의 기울기가 1/20이기 때문인 것으로 보인다. 따라서 이 차륜형상은 저속운행과 곡선운행에 유용할 수 있다.

해석결과는 차륜과 레일간의 접촉점 형성이 차륜 형상에 의해 더 많이 영향 받는다는 것으로 요약된다. 혹은 이것은 레일의 형상이 차륜 형상의 설계목적과 기능을 저해하지 않게 작용한다고도 정리될 수 있다. 따라서 차륜-레일간의 접촉점 측면에서는 레일의 형상은 적합성 결정에 큰 영향을 미치지 않는다고 지금까지의 사항들을 통해 결론지을 수 있다. 다만 이 결론은 모든 차륜과 레일 적합성 검토에 적용될 수 있는 일반론은 결코 아니며 국내에서 운용되는 차륜과 레일모델에 한정하여 접촉해석을 수행하였을 때 얻어지는 결론이다.

3.2 탄소성 접촉점 해석

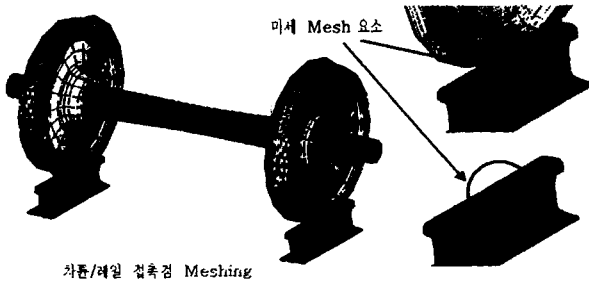


그림 14. 차륜/레일 접촉점 meshing

탄성체 접촉점 해석은 접촉면에서 발생하는 미끄러짐을 고려하여 실제에 보다 가까운 접촉점을 예측할 수 있게 하는 방법이다. 탄성체 접촉 해석을 수행하기 위해서 모든 해석 모델들은 유한요소해석 모델로 만들어져야 한다. 접촉면은 차륜의 운동에 따라 연속적으로 변할 것이다. 따라서 차륜과 레일 사이의 접촉위치 변화를 상세히 확인하기 위해 접촉예상 지역의 mesh는 미세하게 나뉘어진다. 그

림 14는 유한요소해석모델과 접촉면의 미세 mesh 요소들을 도시하고 있다.

해석결과는 강제접촉점 해석에서와 같이 차륜과 레일별 조합에 따라 접촉점 위치의 천이과정을 표시한 것이다. 해석결과에서 붉은 색으로 표시된 부분은 차륜과 레일사이에 다점 접촉이 발생된 순간을 의미한다. 차륜과 레일을 탄성체로 가정하였으므로 접촉면에서 발생하는 미끄러짐과 침투 효과가 강제해석과는 달리 고려된 것이지만 전체적인 경향은 강제해석과 상당히 유사함을 알 수 있다. 즉 차륜과 레일 사이의 접촉점 거동은 레일두부의 형상에 큰 영향을 받지 않았다. 따라서 적어도 국내에서 운용되고 있는 차륜-레일간의 조합에서는 레일의 형상이 적합성 결정에 큰 영향을 미치지 않는다고 탄소성 접촉점 해석을 통해 다시 한번 결론 지워질 수 있을 것이다.

다만 지금까지의 해석은 신조차륜을 대상으로 한 것이며 마모된 차륜이 고려되지는 않았다.

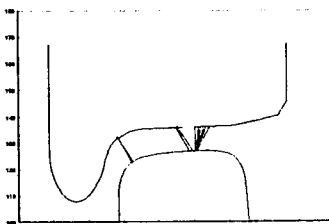


그림 15. KTX-UIC60

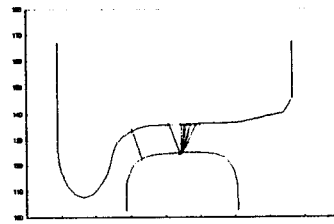


그림 16. KTX-KS50N

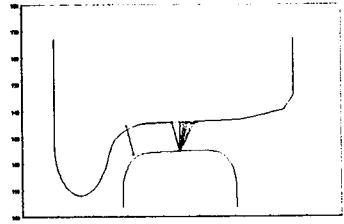


그림 17. KTX-KS60

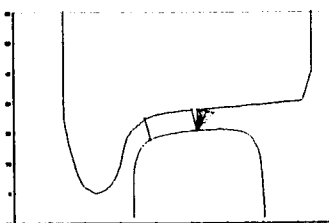


그림 18. Heuman-UIC60

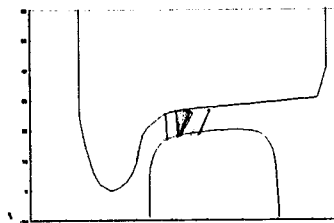


그림 19. Heuman-KS50N

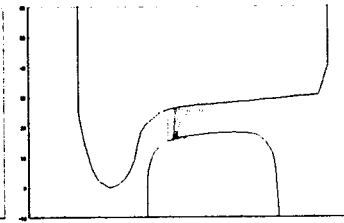


그림 20. Heuman-KS60

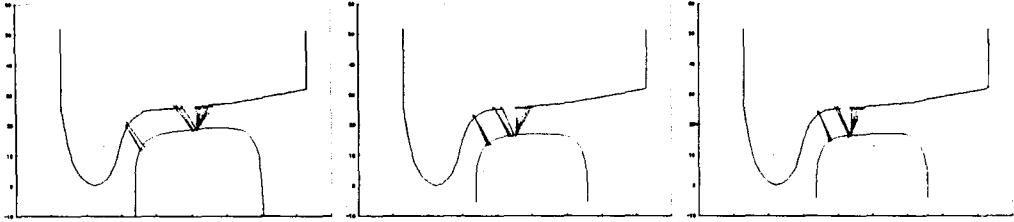


그림 21. 20Normal-UIC60 그림 22. 20Normal-KS50N 그림 23. 20Normal-KS60

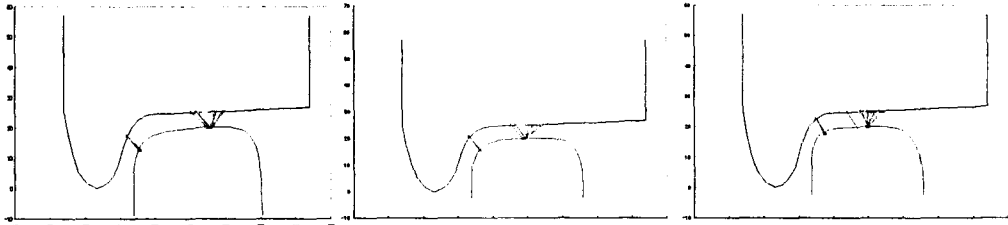


그림 24. 40Normal-UIC60 그림 25. 40Normal-KS50N 그림 26. 40Normal-KS60

4. 접촉 응력해석

2장에서 전제한 것과 같이 기존에 국철에서 운영되고 있는 차륜들과 KS50N 및 KS60 레일과의 적합성은 오랜 운영경험을 통해 검증되었으므로 본 장에서는 향후 연계운행에 의하여 국철구간을 통과하게 될 고속전철 차륜과 기존 레일간의 조합에 대하여 해석을 한정하였다.

접촉점에서 불필요한 응력집중이 발생된다면 누적된 하중에 의한 피로현상과 특정 부위의 이상 마모가 차륜과 레일 양측에서 발생될 가능성이 높아질 것이다. 특히 잔류응력에 의한 피로파괴는 레일 유지보수 부분에서 이슈가 되고있는 부분으로서 향후, 지금의 추세로 차량의 영업속도가 향상되고 화차의 적재 중량이 높아지게 된다면 국내에서도 이에 의한 피해가 커질 것으로 예상된다. 일반적으로 접촉점에서의 최대 응력은 차량이 곡선부를 통과하여 과대 횡압을 받을 때 발생한다. 따라서 본 장에서는 차량이 정지하여 레일과 평형상태를 이룰 때의 접촉점 응력상태와 차량이 횡압을 받아 차륜과 레일이 플랜지 접촉을 일으킬 때의 접촉응력을 동시에 검토하였다.

차륜이 받는 횡압은 차량의 종류와 선로의 상태에 따라 천차만별이겠으나 본 연구에서는 일본 신간선에서 사용하고있는 설계횡압 68kN을 준용하였다.

유한요소해석을 통해 접촉점에서의 응력상태는 그림 27에서 보는 것과 같이 주응력값과 표면압력 형태로 얻어진다. 각 차륜과 레일모델조합들에 대하여 평형상태의 접촉응력과 횡압작용에 의한 플랜지 접촉시의 응력해석 결과는 다음과 같다. 최종 결과는 표 1에 정리되었다.

표 1. KTX차륜과 기존 레일간의 접촉응력 비교

* Max. value 기준 : 단위($\times 10^3$ MPa)

Rail Model	주응력 (평형상태)	접촉면압 (평형상태)	주응력 (횡하중 68kN)	접촉면압 (횡하중 68kN)
KS50N	0.959	0.959	1.528	1.528
KS60	0.905	0.905	1.748	1.748
UIC60	0.912	0.912	1.436	1.436

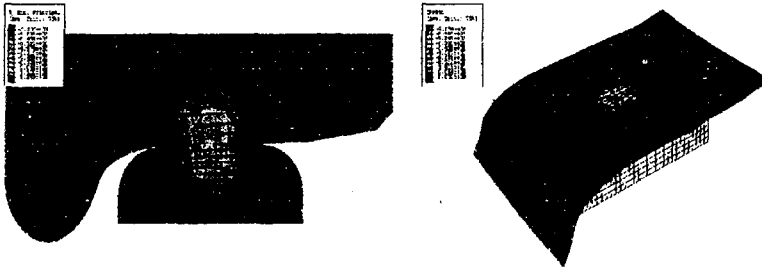


그림 27. 접촉응력 해석(평형상태)

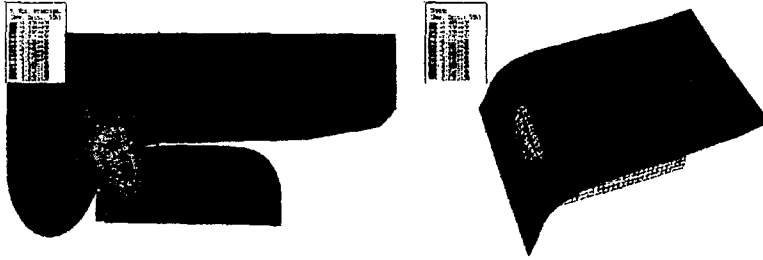


그림 28. 접촉응력 해석(횡압작용 상태)

표 1의 결과에서 볼 수 있듯이 KTX 차륜과 기존레일간의 조합에서 평형상태 조건일 때는 모든 경우에서 비슷한 수준의 응력이 발생되었다. 반면 횡하중 68kN이 작용하여 차륜과 레일이 플렌지 접촉을 하고있을 때는 원래 KTX와 정식조합인 UIC60 레일일 때가 가장 낮았으며 KS60과의 조합에서 가장 높은 응력상태를 보였다. 따라서 본 해석의 결과만을 본다면 기존 레일과 KTX 차륜과의 곡선부 적합성은 UIC60, KS50N 그리고 KS60순으로 우수하다고 볼 수 있다. 이 결과는 2장에서 언급한 정적해석의 결과를 통해서도 예측되던 결과이다. 다만, 이것은 차륜과 레일이 신조상태일 때를 전제한 것이었으므로 마모의 진행이 연속적으로 이루어지는 실제의 운행 상황을 정확히 대표하는 결과라고는 볼 수 없다.

기존 레일 중 KS50N의 주응력 크기가 UIC60과 다음으로 작게 나오는 것은 레일의 측면부가 UIC60과 동일하게 조합되었기 때문으로 보인다.

5. 60kg급 중량레일 규격제안

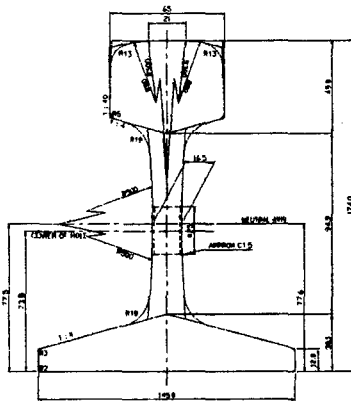


그림 29. 수정레일 형상

지금까지의 결과를 종합하면 KS50N 두부형상이 KS60에 비하여 KTX차륜과의 적합성(정적해석, 응력해석) 측면에서 다소 유리하다는 결론을 얻을 수 있다. 따라서 유지보수성(구조해석 결과)이 우수한 60kg급 레일이 사용되면서도 KTX 차륜과의 호환성이 보장될 수 있다면 현 시점에서 가장 바람직할 것이다. 이러한 전제 하에 KS50N의 두부형상과 KS60레일의 저부형태를 결합한 새로운 레일형태를 구상하였으며 이것이 그림 29에 도시되어있다.

표 2에서 도시된 것과 같이 수정된 레일의 형상은 레일의 두부를 제외하고 모두 KS60레일과 동일한 규격을 가지도록 설정되었다.

표 2. 레일형상 특성 비교

비교항목 \ 레일모델	KS50N	KS60	UIC60	수정레일	비고
레일높이 (mm)	153.0	174.0	172.0	174.0	KS60과 동일
레일두부폭 (mm)	65.0	65.0	74.3	65.0	KS50N,60과 동일
저부길이 (mm)	127.0	145.0	150.0	145.0	KS60과 동일
두부높이 (mm)	37.18	40.875	37.49	40.875	KS60과 동일

6. 결론

본 연구에서는 현재 국철에서 많이 사용하고 있는 KS50N 및 KS60레일 단면형상을 중심으로 고속열차(KTX)와 인터페이스상의 적합성을 검토하였으며 이들 결과를 토대로 KTX와 적합성을 유지하면서 중량레일의 장점을 갖는 신형 레일단면 형상을 제시하였다.

신형 레일규격을 제정하기 위하여 차륜과 레일의 간섭면적 및 시기를 검토하는 정적해석, 접촉점 형성 pattern을 검토하는 접촉점 해석, 플랜지 접촉이 발생될 때의 응력상태를 검토하는 응력해석, 레일형상에 따른 차량 동특성 변화를 검토하는 동특성 해석이 실시되었다. 또한 제시된 레일의 안전성을 검증하기 위하여 기존의 레일들과 함께 신형 레일의 구조해석이 수행되었고 이 결과는 다른 레일들의 결과와 비교되어졌다.

지금까지 연구 결과들은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (1) 본 연구를 통해 수행된 모든 해석들을 종합한 결과 신조 형상을 기준으로 KTX 차륜과의 적합성 측면에서 KS50N이 KS60보다 유리할 것으로 판단된다.
- (2) KS50N의 두부와 KS60레일의 저부를 갖는 신형 레일규격을 제시하였다.
- (3) 제안된 신형 레일규격이 사용되면 기존차량과 함께 고속전철 차량과도 양호한 호환성을 보일 것으로 예측된다.
- (4) 본 연구를 통해 제안된 신형 레일규격이 국철에 사용된다면 유지보수 측면에서 많은 경제적 이익을 가져올 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 정우진, 양신추, 강윤석(2001), "새로운 레일규격 제정을 위한 기초검토," 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회, pp. 467-474
2. 이지하, R. Farabet(2000), "레일과 차륜의 마모에 대한 기하학적 검토," 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회, pp. 442-449
3. 김기환, 박춘수, 정경렬(1999), "Whell/Rail 접촉점의 Parameter에 관한 연구," 춘계학술대회 논문집, 대한기계학회, pp. 155-160