

레일과 차륜의 마모에 대한 기하학적 검토

A geometrical review on the wear of rail and KTX wheel

이지하* 이희업** 이희성*** 강기석**** R. Farabet*****
Lee, Jeeha Lee, Hee-up Lee, Hisung Kang, Ki-sok

Abstract

Before the complete construction of new high-speed line between Seoul and Pusan, KTX is going to operate on both new high-speed line between Seoul and Daegu and electrified conventional lines between Daegu and Pusan. Then, the wheels of KTX are going to operate on various rails such as KS50N and KS60 of conventional line as well as UIC60 of high-speed line. Also, conventional line will have a mixed traffic mode with various types of trains operating on it, such as Saemaul and Mugunghwa. Hence, this study reviews the wear phenomena of wheels and rails in geometrical point of view by comparing their profiles. The analyses of the results show that because UIC60 rail is designed for KTX, KS50N rail whose profile is similar to that of UIC60 will not have any impact on the shape of wheel wear. On the other hand, KS60 rail is expected to have partial wear on both the flange of KTX wheel and the gauge corner of the rail in the initial stages. However, the operation of the trains whose wheels have 1/20 conicity will cause partial sidewear on the inside of the rail and the movement of the contact point between KTX wheel and the rail toward the inside of the track. As a result, the flange wear of KTX wheel will be reduced and the formation of wear-equilibrium profile will be faster.

1. 서론

현재 추진 중인 경부고속철도 건설 사업에서 서울-대구 구간은 고속신선을, 대구-부산 구간은 기존선을 전철화하여 서울-부산 간 전 구간의 2004년 4월 개통을 목표로 건설하고 있으며, 2010년 서울-부산 구간을 고속신선으로 완전개통하기 전까지는 KTX 차량이 고속신선과 기존선상을 동시에 운행하게 된다. 따라서 KTX 차륜이 고속선의 UIC60 레일 뿐 만 아니라 기존선의 KS50N, KS60 레일 등 다양한 레일 위를 주행하게 된다. 또한 기존선 구간에서는 기존의 새마을, 무궁화 및 화물열차가 혼합 운행하는 복잡한 교통형태를 가지게 되어 마모형태 또한 복잡한 양상을 띠게 될 것이다.

레일과 차륜의 마모는 차량 주행에 따른 동적 효과에 기인한 것으로 매우 복잡한 메커니즘을 가지고 있어 그 현상의 설명이나 예측이 무척 어렵다. 따라서 최근 수십년간 마모의 원인이나 현상을 구명하기

* 한국철도기술연구원 주임연구원, ** 한국철도기술연구원 선임연구원, *** 한국철도기술연구원 책임연구원

**** 철도청 고속철도본부, ***** SNCF-I

위하여 실험적, 해석적 관점에서 다양한 접근을 시도하였으며, 상당한 성과를 거두고 있지만 레일과 차륜의 마모 현상에 대한 명확한 진단 및 구명에는 여전히 현실적인 제약이 존재하고 있다.

본 연구에서는 레일과 차륜의 마모 현상에 대하여 정적인 상태의 레일/차륜 형상비교를 통한 기하학적 관점에서 차륜과 레일의 적합성을 검토한다. 즉, 레일의 경좌와 차륜 담면구배 등을 고려하여 KTX 차륜과 레일의 접촉 면적과 접촉점 위치 등의 변수에 대한 영향을 UIC60 레일과 비교하여 KS50N 레일이나 KS60 레일이 형상적인 측면에서 어떤 차이가 있으며, 마모에는 어떤 영향을 미치게 될 것인지를 구명하고자 한다. 정적인 선형 검토만으로 레일과 차륜의 마모 메커니즘을 설명할 수는 없겠으나, 기존의 해석적 연구와는 다른 관점에서 마모 문제를 바라볼 수 있는 계기가 될 것으로 판단된다.

2. 레일 프로파일의 비교

경부고속철도에서 대구-부산 간의 기존선 구간은 2010년 경부고속철도의 완전 개통까지는 고속열차인 KTX와 기존의 새마을, 무궁화 등의 여객열차와 화물열차가 혼합 운행되므로 KTX 차량은 고속선 구간에서는 UIC60 레일 위를, 기존선 구간에서는 KS50N 레일과 KS60 레일 위를 주행하게 된다. 따라서 KTX의 차륜과 이들 레일과의 적합성 검토가 필요하다.

UIC60 레일은 세계철도연맹(UIC)에서 제정한 레일 프로파일로서 오랜 운행경험을 통하여 그 지역의 사용 환경에 따라 마모된 레일의 프로파일을 참조하여 설계되었으므로 마모가 어느 정도 진행된 후에도 그 기본 형상을 유지할 수 있다. 차륜의 담면형상 또한 레일의 이러한 프로파일에 적합하도록 설계된다.

경부선의 경우는 주로 KS50N 레일이 부설되어 있으며, 교량, 터널, 급곡선부 등 특정 구간에는 보다 큰 중량의 KS60 레일로 교체 부설되고 있다. 현재까지는 경부선 총연장의 15%가 KS60 레일로 부설되어 있으며, 그 비율이 점차 증가하고 있다.

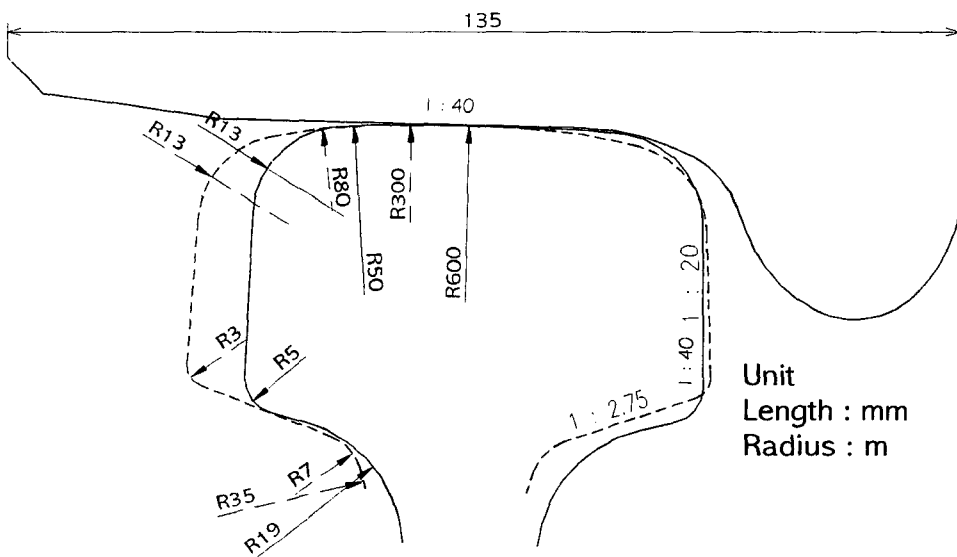


그림 1. UIC60 레일과 KS60 레일의 프로파일 비교

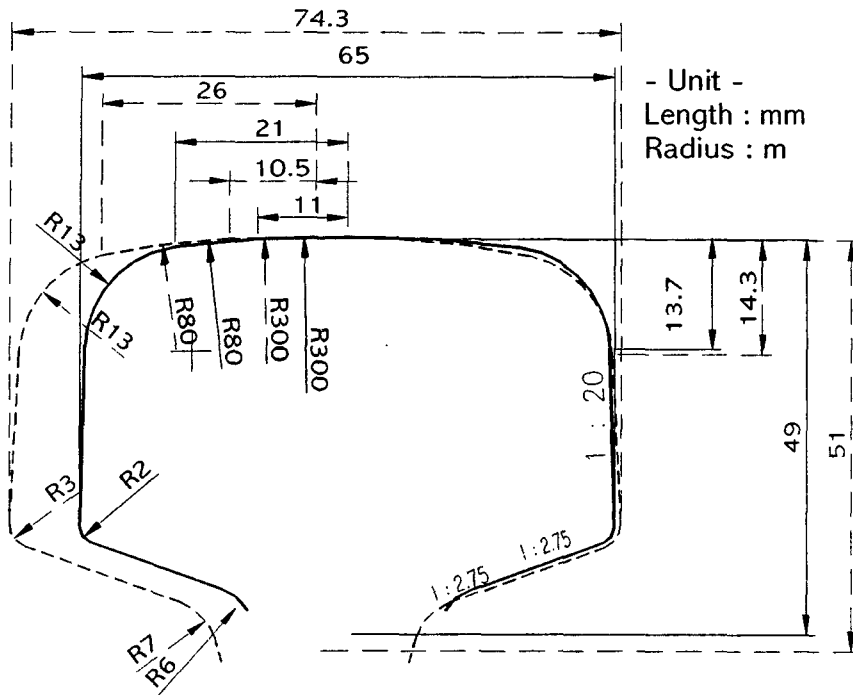


그림 2. UIC60 레일과 KS50N 레일의 프로파일 비교

KS60 레일은 일본의 60kg 레일과 프로파일이 같다(그림 1의 실선).

레일 두부의 폭은 KS60 레일이 65mm로 UIC60 레일(그림 1의 점선)의 74.3mm보다 더 작으며 높이는 각각 172mm와 174mm로 비슷하다. KS60 레일의 정상부 곡선반경은 600m로 UIC60 레일의 300m보다 크며, 게이지코너부의 곡선반경은 50m로 UIC60 레일의 80m 보다 작다. 이는 KS60 레일이 UIC60 레일보다 폭은 좁고, 정상부의 곡선은 편평하며 게이지코너부의 곡선은 UIC60 보다 각진 것을 말한다. 따라서 UIC60 레일의 두부곡선이 KS60 레일의 곡선보다 더 완만하다고 볼 수 있다.

KS50N 레일 단면적과 폭, 높이는 작지만 두부 형상의 곡선반경은 UIC60과 거의 일치한다. KS50N 레일은 일본의 50kg N 레일과 프로파일이 같다. 또한, 레일 두부의 폭은 UIC60 레일이 74.3mm로(그림 2의 점선) KS50N 레일의 65mm보다 넓으며(그림 2의 실선) 높이는 각각 172mm와 153mm이다. 레일 정상부의 곡선반경은 500m이며, 게이지코너부의 곡선반경은 13m이다. 또 이 두 곡선은 곡선반경 80m의 곡선으로 이어져 있다.

KS50N 레일의 두부의 측면 경사는 1/40이며, UIC60 레일은 부설되는 침목의 경좌에 따라 두부의 측면 경사가 1/20이나 1/40인 두 종류로 제작되는데 이 두 종류의 레일은 레일 두부의 측면 경사만 다르고 두부의 곡선반경과 폭, 높이 등 다른 프로파일은 동일하다. 이러한 두부의 측면 경사는 레일이 침목 위에 1:20 또는 1:40의 경사로 놓이게 될 때 레일의 내측면이 지면에 수직이 되도록 하기 위함이다.

KS50N 레일은 UIC60 레일보다 단면적과 높이, 폭 등은 작지만 차륜과 접촉하는 부분의 프로파일을 구성하는 곡선의 반경은 완전히 일치한다.

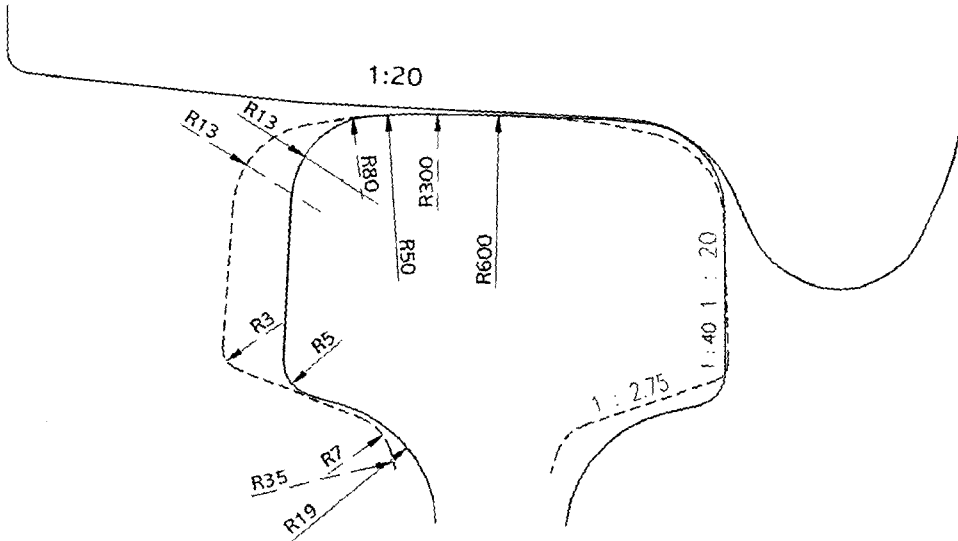


그림 3. 차륜 답면 경사 1/20에서 KS60 레일과 UIC60 레일 비교

3. 답면 경사

차륜의 답면 경사는 1/40과 1/20이 주로 사용되고 있다. 일반적으로 차륜의 답면 경사도를 높이면(예를 들어 1/40에서 1/20으로) 횡력이 캔트부족량에 의한 수직력보다 커져 결과적으로 차량의 사행동 효과가 커질 수 있다.

그림 3의 경우와 같이 차륜답면의 경사가 1/20이고 레일 경좌가 1/40인 경우는 편심 되어 작용하는 차륜하중 때문에 레일에 비틀 효과(twisting effect)를 주게 된다. 반면 1/40의 차륜 답면 경사도에서는 그림 1에서처럼 차륜의 답면과 레일 정상부의 상면이 거의 평행함을 알 수 있다. 따라서 차륜/레일 주행선이 레일 두부의 중앙선에 아주 가까워지게 된다. 1/40 경사도는 차륜/레일의 접촉영역이 레일의 게이 지코너부에 너무 가까이 가지 않도록 해주어서 편마모 뿐 만 아니라 게이 지코너부 셸링(shelling) 현상의 발생가능성도 줄여준다. 그러나 슬랙의 영향이 1/40 경사도의 차륜에 대하여 플랜지 마모를 더 많이 발생하게 할 가능성이 있다고 생각되는데 이는 답면의 경사도가 작아지면 차륜이 횡방향으로 밀리기 쉬워지므로 슬랙이 있는 상태에서는 전체 유격거리(play)가 커져서(표 1 참조) 곡선부 통과시 플랜지에 과도한 충격이 가해진 결과로 추측할 수 있다.

프랑스의 경우는 곡선부에서 슬랙을 없애고(곡선반경 150m이상의 곡선부에서^{[1])}, 차륜의 답면경사를 1/20에서 1/40으로 바꾸어 나가고 있는 추세이다. 그 이유는 승차감 향상과 동적안정성 확보, 마모 감소 등이다.^[2]

차륜의 답면 경사도가 1/20인 경우 KS60 레일 상을 주행할 때 레일의 셸링 발생 가능성이 있다. 즉 차륜/레일 접촉점이 레일의 중심축선으로부터 궤도 내측으로 15mm 벌어진 곳에 위치하게 된다. 그림 4와 같이 이 위치는 레일 두부 프로파일의 곡선반경이 변하는 바로 그 위치와 정확하게 일치한다(600mm에서 50mm로 변화함).

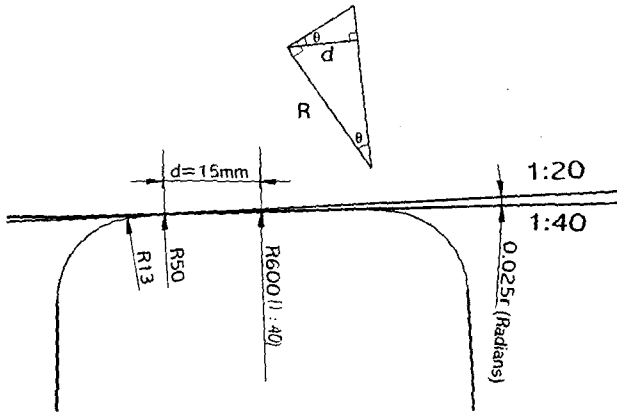


그림 4. 1:40 레일과 1:20 차륜의 접촉점

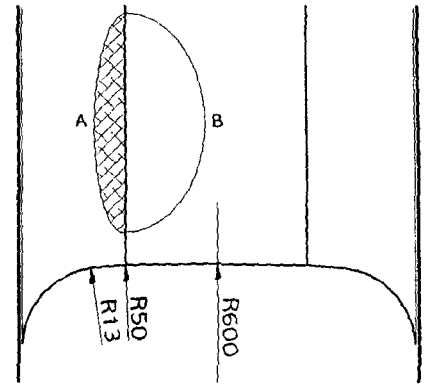


그림 5. 1:40 레일과 1:20 차륜의 접촉영역

레일과 차륜의 접촉선에서 곡선반경이 변화 한다는 것의 의미는 그림 5와 같이 차륜과 레일의 접촉 영역중 A구역과 B구역의 면적이 달라서 상대적으로 면적이 작은 A구역에 B구역보다 더 큰 응력이 집중되어 두 구역이 불균등한 응력을 받게 되어 레일의 쉐어링현상을 일으키는 원인이 될 수도 있기 때문이다.^[2]

4. 접촉점의 위치

그림 7~9는 KTX 차륜과 각 레일의 접촉점 위치이다. 그림 7은 KTX 차륜과 KS60 레일과의 접촉점 위치이며 레일 두부와 차륜담면은 레일경도가 1/40이고 KTX 차륜의 담면 경사도 1/40 이므로 평행하며, 수직 접촉은 레일의 정상부 중심에서 만나게 된다. 그러나 횡방향 접촉은 플랜지 내면으로부터 45.89mm 떨어진 곳에서 발생하는데 이 값은 KS50N 레일이나 UIC60 레일의 값보다 큰 값이며 KS60 레일의 게이지코너부가 다른 두 레일의 프로파일에 비하여 각진 형태를 하고 있으므로 곡선부가 많은 선구에서는 플랜지 마모를 더 많이 일으킬 것으로 판단된다.

UIC60 레일도 KS60 레일과 마찬가지로 2점 접촉이 이루어지고 있지만 접촉면적이 더 넓어 하중분산이 잘되고 있다. 따라서 기존선의 KTX 운행 초기에는 신품 KS60 레일이 KTX 차륜에 초기 플랜지 마모를 유발할 가능성이 있다. 그러나 그림 3에서와 같이 기존차륜의 1/20 경사도로 인하여 신품 KS60 레일의 두부 내측면에 편마모가 발생하면서 오히려 KTX 차륜과의 접촉점이 궤간 내측으로 이동하며 접촉면적도 더 넓어질 것으로 생각된다. 결과적으로 초기에는 차륜의 플랜지 마모와 KS60 레일의 편마모가 발생하겠지만 곧 평형 마모 형상에 도달하여 장기간으로는 레일 프로파일의 마모도 줄어들고 차륜의 삭정주기도 길어질 것이다.

표 1은 SNCF, KTX 그리고 기존 차량의 차축에 관련된 기준들이며, 차륜 플랜지 두께와 플랜지 간의 거리는 레일 상면에서부터 10mm아래 높이에서의 두께와 거리를 측정한 것이다. 표 1에 의하면 전체 유격거리 기준치에 대하여 KTX의 기준과 기존 차량의 값이 별로 차이하지 않으나 최대치를 서로 비교하면 9mm의 차이가 난다. 이는 슬래에 의한 영향으로 마모에 불리한 요소가 될 수도 있다.

KTX가 기존선을 운행할 경우는 KTX의 최소 플랜지간 거리 1,410mm에 대하여 기존선 궤간 최대값

1,445mm의 차인 유격거리의 값은 35mm로서 프랑스 기준 고속선의 전체 유격거리 31mm와 크게 차이 나지는 않으므로 유격거리에 의한 마모의 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

표 1. SNCF, KTX 및 기존 차량의 차축기준

항목 (mm)		KTX	기존차량	SNCF	비 고	
차륜내측간 거리(Dw)	최소치	1,354	1,348	1,359		
	기준치	1,355	1,353	1,360		
	최대치	1,356	1,358	1,361		
차륜 플랜지 두께(Tf)	최소치	28	23	28	레일 상면으로부터 10mm 아래 높이에서 측정	
	기준치	32.5	32	32.5		
	최대치	32.5	34	32.5		
플랜지 간 거리(Df)	최소치	1,410	1,394	1,415	플랜지 외측 면에서 측정	
	기준치	1,421	1,424	1,425		
	최대치	1,421	1,426	1,426		
궤간(Dg)	최소치	1,430	1,432	1,432	정비 기준 및 슬랙을 포함한 값	
	기준치	1,435	1,435	1,435		
	최대치	1,441	1,445	1,440		
전체 유격거리 (Dp)	최소치	9	8	6	Dg(최소치)-Df(최대치)	별도 규정으로 조정
	기준치	14	11	10	Dg(기준치)-Df(기준치)	
	최대치	31	40	25	Dg(최대치)-Df(최소치)	

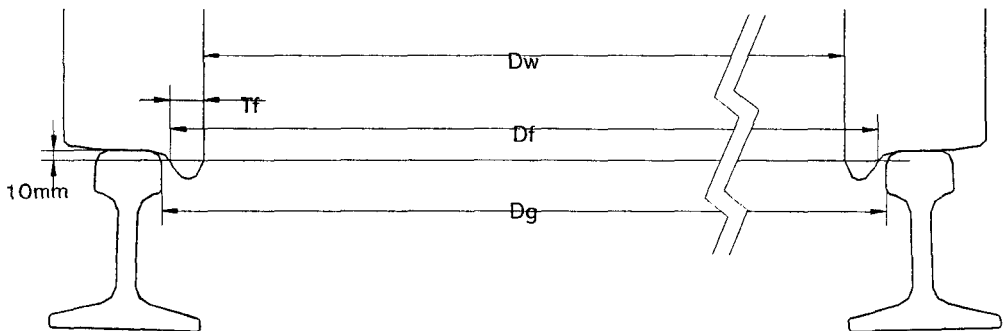


그림 6. 차량의 차축기준

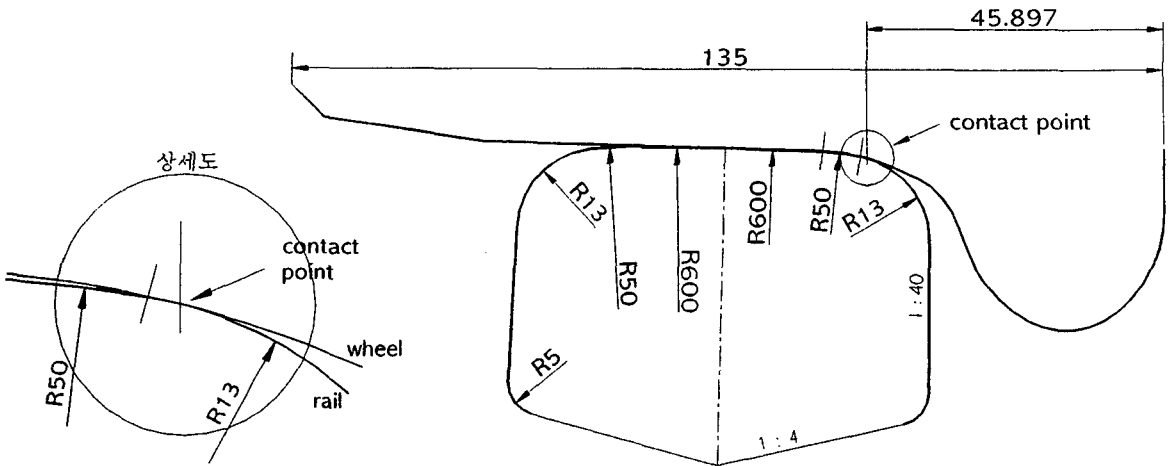


그림 7. KS60 레일과 KTX 차륜의 접촉점

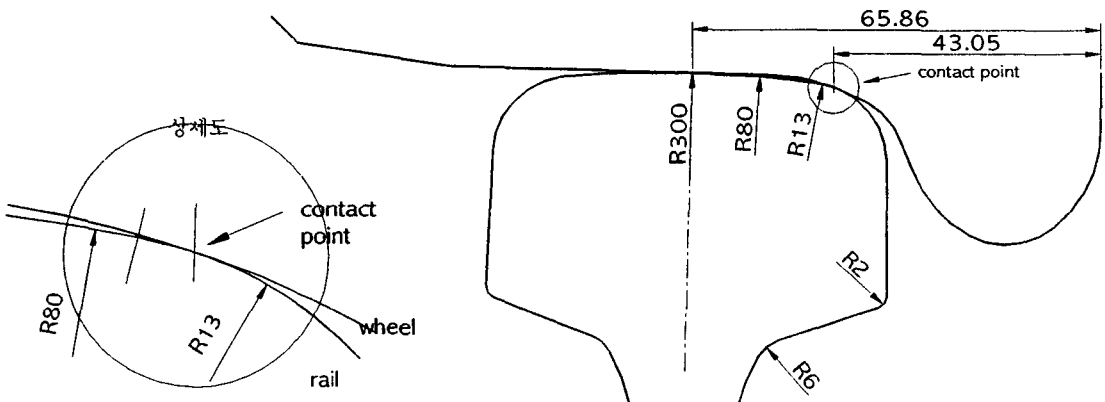


그림 8. KS50N 레일과 KTX 차륜의 접촉점

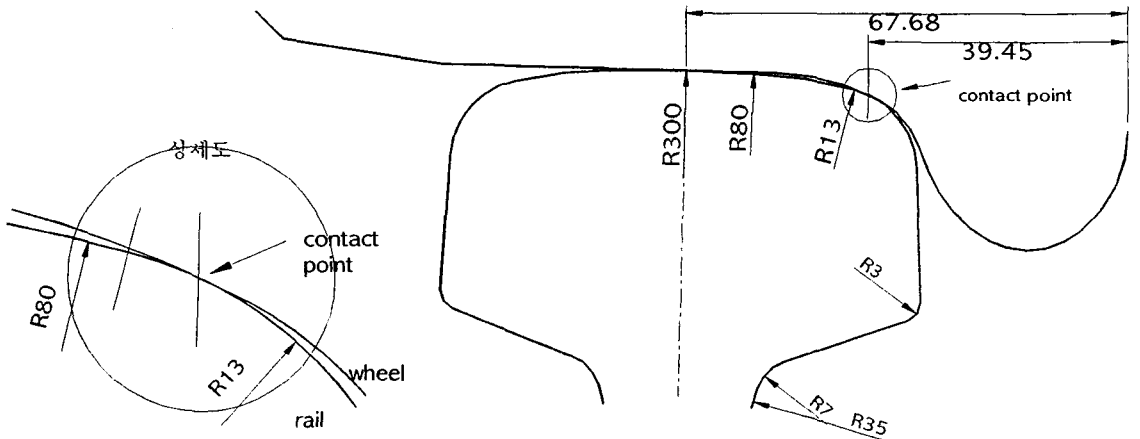


그림 9. UIC60 레일과 KTX 차륜의 접촉점

5. 결론

이상의 검토 결과를 종합해볼 때, UIC60 레일이 KTX와 적합하도록 설계되었으므로 UIC60 레일과 프로파일이 거의 유사한 KS50N 레일은 차륜의 마모형태에 영향을 주지 않을 것으로 분석된다. 그러나, KS60 레일은 다른 두 레일에 비하여 두부는 평평하고 게이지코너부는 각진 형상을 하고 있으므로, 초기에는 곡선부가 많은 기존선 구간을 혼합운행할 경우 차륜의 플랜지마모를 어느 정도 일으킬 것으로 판단된다. 그러나 1/20의 경사를 가진 기존 차량과 혼합운행을 하게 되면, KS60 레일의 두부면의 내측이 마모되어 약간의 편마모가 발생하고 이의 영향으로 KTX 차륜과의 접촉점이 궤도 내측으로 이동하게 될 것이다. 결과적으로 KTX 차륜의 플랜지마모를 줄여주게 되어 평형마모 프로파일에 빨리 도달하게 된다. 따라서, 1/20 경사의 기존 차량의 차륜과 1/40 경사의 KTX의 혼합운용이 레일의 마모 측면에서 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. UIC Code 710 R Slacking of track gauge on curves
2. R. Farabet(2000), " Rail/Wheel compatibility", SNCF-I interoffice memoranda TB00/08/03
3. 이희성(1999), "차륜/레일 마모 예측 및 유지보수 기준연구", 한국고속철도건설공단