

고속열차 차륜 플랜지 마모

이희성* · 강부영*

서울산업대 철도전문대학원 철도차량시스템공학과
*런던 임페리얼대학교 기계공학과

Flange Wear of the High Speed Train

Hisung Lee[†] and Bu-Byoung Kang*

Graduate School of Railroad, SNUT
*Imperial College in London, UK

Abstract – During the high speed train operation in the conventional line, it was found to have extremely severe flange wear, due to the curvy routes. This paper looks at the actions that have been taken to bring the wear to an acceptable level. In particular, it have been presented for flange wear variation depending on curve radius, cant, transition curve length by using numerical method. And the impacts on the flange wear by the application of stick type solid lubricant are also presented.

Key words – conventional line, flange wear, transition curve, solid lubricant.

1. 서 론

2004년 4월 상업운행을 개시한 고속열차(KTX)의 기존선 운행구간은 개통 전에 시설정비사업을 통하여 곡선반경 600 m이하는 600 m이상으로 선형개량을 하였다. 그러나 아직도 고양기지-광명, 대전-송정리 구간은 곡률반경이 작은(400 m, 500 m, 600 m, etc) 곡선부구가 많기 때문에 차륜과 레일의 심각한 플랜지 마모를 발생시키며, 이는 결과적으로 차륜과 레일의 수명을 현저하게 감소시켜 높은 유지보수 비용이 발생한다. 특히, 고속열차(KTX)는 본래 고속선 주행을 위해서 설계된 차량으로 현가장치의 유연성이 떨어지며 관절형 대차를 적용한 장대편성 열차이기 때문에 기존선 구간 주행시에는 차륜의 레일에 대한 공격각이 커져서 차륜 플랜지 마모는 필연적으로 심각한 수준이 된다. 그리고 고속 신선에 비해서 기존선의 궤도틀림상태도 상대적으로 등급이 낮기 때문에 차륜플랜지 마모가 상대적으로 커지게 된다. 본 논문에서는 우선 기존선 곡선부 주행시 주행거리 에 따른 차륜 플랜지 마모 특성에 대한 수치해석적 연

구를 수행하여, 차륜 형상별(GV40, XP55), 곡선반경별, 캔트변화 및 완화곡선 길이에 따른 차륜 플랜지 마모에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 기존선 주행시 차륜 플랜지 마모를 제어 및 관리하기 위해서 차륜/레일 인터페이스면에 고체윤활제를 적용한 차량과 적용하지 않은 차량의 플랜지 마모 특성을 비교 분석하고, 계속한 마모량을 참고하여 고속차량이 기존선 구간을 운행하는 경우에 고체윤활제 적용에 따른 차륜삭정주기를 마모의 관점에서 예측하였다.

2. 수치해석

2-1. 열차 편성

본 연구에서 사용한 고속열차(KTX)의 주요제원은 PC(동력차) + MT(동력객차) + 14T(객차) + MT(동력객차) + PC(동력차)로 구성되었으며, 동력차와 동력객차의 전위부 대차는 일반 2축대차이나 동력객차 후위부나 객차는 관절대차로 구성되어 있다.

2-2. 차륜/레일 모델링

고속열차에 사용되는 차륜은 GV40(동력차)과 XP55

[†]주저자 · 책임저자 : hslee@snut.ac.kr

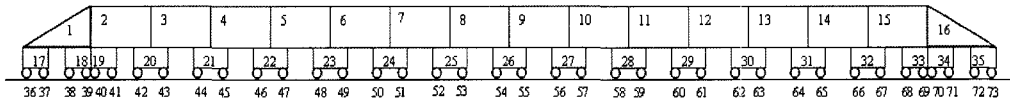


Fig. 1. KTX trainset formation.

(객차)[5]이며 기존선 구간 레일은 KS50이 적용되었으며, 각종 차량시스템자료는 Alstom 공급자 자료를 사용하였다. 해석에 사용한 궤도모델은 궤도검측데이터를 이용하여 Vampire해석 모델로 변환하여 사용하였다.

2-3. 기존선 구간(서울-화전)을 이용한 플랜지 마모지수 해석

차륜/레일 접촉에 의한 마모모델 중에서 접촉에너지 마모모델(Contact Patch Work)은 차륜과 레일 접촉에서 크리퍼지에 의해서 소비된 마찰에너지가 접촉표면에서 일정량의 금속소재를 제거시킨다는 간단한 가정

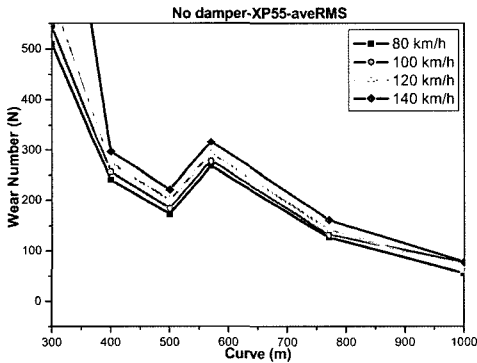
근거한 마모이론[1,2]이다. AEA Technology의 Vampire 매뉴얼[3]에서 사용하는 마모모델에 따르면 가혹마모와 정상마모의 2가지로 구분하여 제시하고 있다.

$$\begin{aligned}
 T\gamma < 160 \text{ N} & \quad W = 0.005T\gamma \\
 T\gamma \geq 160 \text{ N} & \quad W = 0.025T\gamma - 3.2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

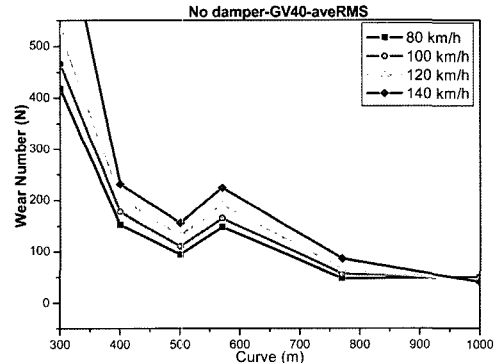
여기서, $T\gamma = F_{lat}/l_{ca} + F_{long}/l_{ong}$ 는 마모수(wear number)이며, 단위는 N으로 접촉점에서 발생되는 마찰에너지의 정도를 나타내며, W 는 마모지수(wear index)이며 마모량 상대비교에 사용된다.

2-3-1. 곡선반경별 차륜 마모지수 변화

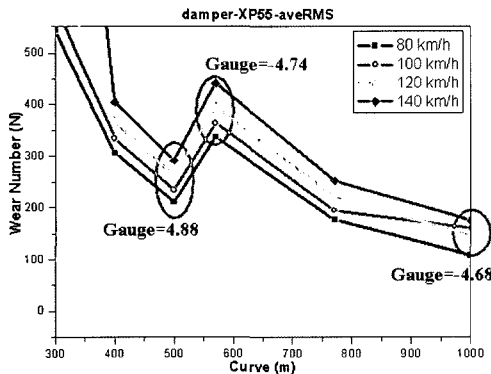
기존선(서울-화전)구간에 있는 각각의 곡선반경을 가



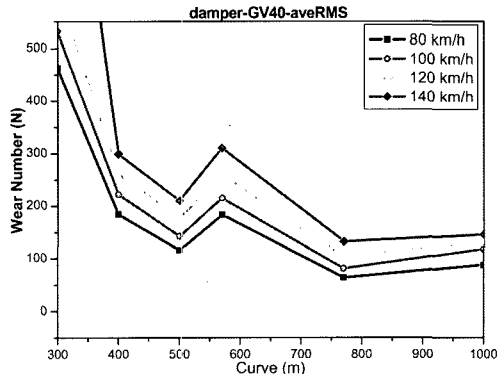
(a) w/o lateral damper



(a) w/o lateral damper



(b) with lateral damper



(b) with lateral damper

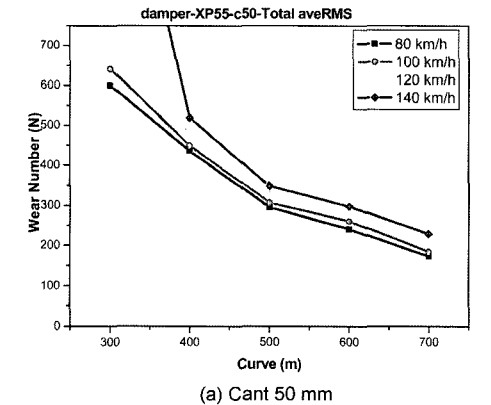
Fig. 2. Variation of wear index of XP55 wheel depending on curve radius.

Fig. 3. Variation of wear index of GV40 wheel depending on curve radius.

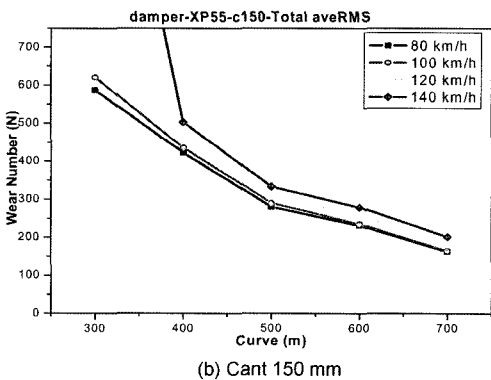
지고 수치해석을 실시한 결과 곡선반경이 800 m이하에서 위에 설명한 식(1)의 기준에 의하면 가혹한 마모상태에 해당하며, 실제 기존선주행시 측정된 차륜의 형상을 보면 플랜지에 과대마모가 발생하였다. Fig. 2와 Fig. 3을 보면 주행속도가 증가하면 마모지수가 증가하며, 곡선반경이 감소하면 마모지수가 역시 증가한다. 또한 횡뎀퍼를 적용한 경우가 적용하지 않은 열차보다 마모지수가 큰 것도 알 수 있다. Fig. 2를 보면 곡선반경 500 m보다 600 m에서 마모지수가 큰 데, 해석구간의 궤도틀림량을 확인해보면 곡선부 평균 궤간(Gauge)이 R500 m일 때는 4.88 mm으로 궤간이 확장되었고 R570 m일 때는 -4.74 mm으로 궤간이 축소되었으나 캔트는 오히려 크게 설정되어 있고 다른 틀림



Fig. 4. Curve design data.



(a) Cant 50 mm



(b) Cant 150 mm

Fig. 5. Variation of wear index depending on cant of curve radius.

량은 비슷한 크기인데 궤간 값만 약 10 mm에 가까운 차이를 나타내므로 이 값의 차이가 마모지수의 차이 라고 판단된다.

2-3-2. 캔트 변화에 따른 플랜지 마모 특성

곡선에서 캔트의 영향을 알아보기 위해 Fig. 4와 같이 동일한 곡선에서 캔트를 변경하며 플랜지마모지수의 변화를 분석하였다. Fig. 5에서 보면 객차차륜의 캔트의 값이 클수록 플랜지마모지수가 감소하나 그 값이 미미하고, 특히 곡선반경에 의하여 가혹 마모상태에 있는 플랜지마모상태를 정상마모상태로 변경할 수 있을 정도의 값은 아니다. 따라서 열차특성을 변경하지 않고 플랜지마모를 감소시키기 위해서는 곡선을 개량하여 곡선반경을 증가시키거나, 열차운행속도를 감소시키는 방법이 캔트값을 증가시키는 것 보다 매우 효과적이다.

2-3-3. 완화곡선 변화에 따른 플랜지 마모 변화

곡선부에서 완화곡선의 길이가 차륜마모에 미치는 영향을 분석하고자 Fig. 6, Fig. 7과 같은 곡선데이터를 이용하여 완화곡선을 50 m, 100 m, 150 m, 200 m로 변경시키며 해석하였다. Fig. 8은 완화곡선변화에 대한 플랜지 마모지수 변화를 나타내며, 해석결과 완화곡선변화가 플랜지마모지수의 변화에 미치는 영향은 미미하다.

3. 고체윤활제 성능시험

현재, 고속열차에 설치된 도유시스템은 편성차량의 1번째 및 마지막 객차대차에 설치되어, 운행속도에 따라 주기적으로 차륜 플랜지에 오일을 분사하여, 차륜 플랜지와 레일게이지 면을 도유한다. 그러나 기존선 곡선구간 운행시에는 차륜과 레일 인터페이스 면에서 후

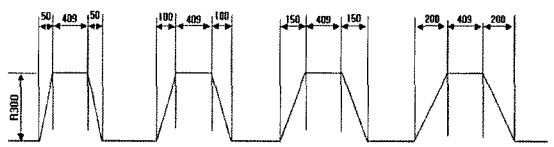


Fig. 6. Curve design data with transition curve(R300m).

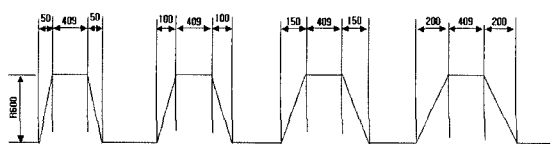
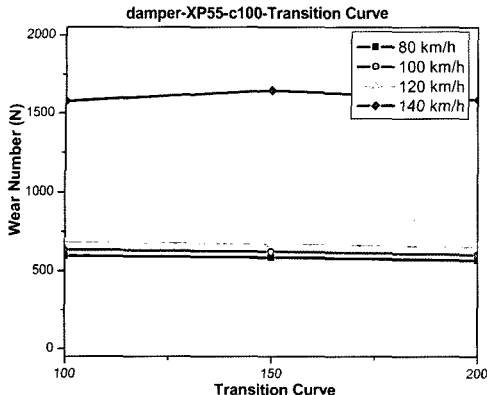
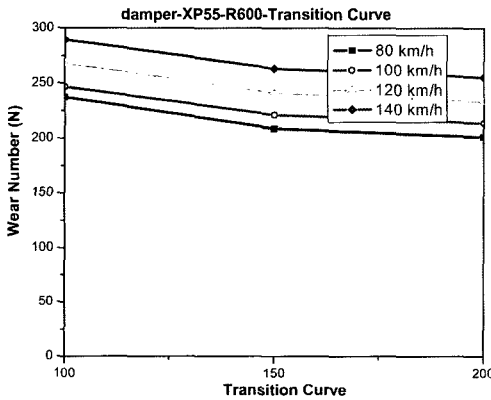


Fig. 7. Curve design data with transition curve(R600m).



(a) Radius 300 m



(b) Radius 600 m

Fig. 8. Variation of wear index of XP55 wheel depending on transition curve.

속 차륜이 계속 통과함에 따라 윤활막이 쉽게 파손되어 윤활막이 유지되지 않으므로 매우 심각한 차륜 플래지마모가 발생한다[4]. 이에 따라 곡선부에서 충분한 윤활이 되도록 기존의 차상 도유기 대신에 고체 윤활제를 고속열차에 적용하기 위하여 고체 윤활제 적용 차량과 비적용 차량간의 마모율 비교와 고체윤활제 소모량 계측을 통하여 고체윤활제 적용시에 플래지 마모 특성을 비교 분석하고자 한다.

3-1. 고체윤활제 설치 위치 선정

고체윤활제 설치위치는 고체윤활제를 적용하기 전 기존선 주행시 측정된 플래지구배(Qr) 마모량을 기준으로 마모량이 큰 위치에 Fig. 9와 같이 선정하였다[5].

3-2. 고체윤활제 성능 시험 결과

고속열차의 차륜단면형상은 플래지두께(Sd), 플래지

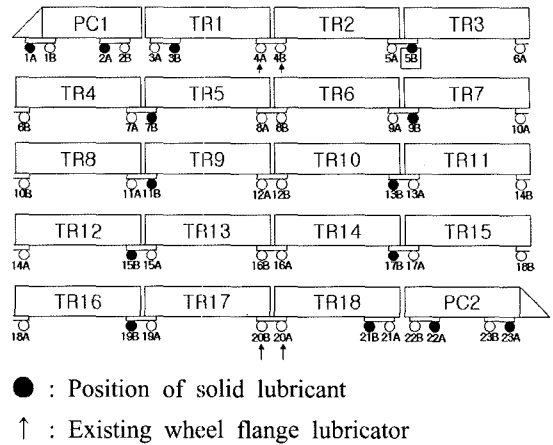


Fig. 9. Installation position of stick-type solid lubricant.

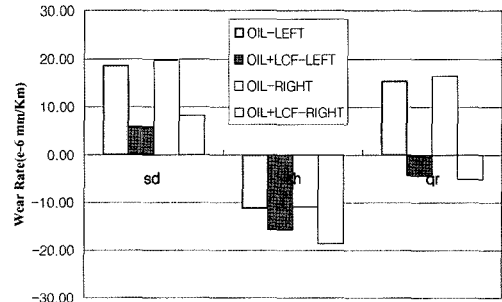


Fig. 10. GV40 wheel wear with and w/o solid lubricant.

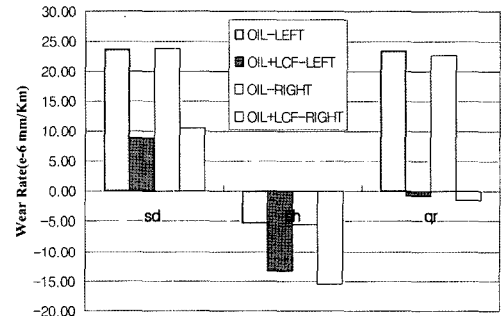


Fig. 11. XP55 wheel wear with and w/o solid lubricant.

구배(qR), 플래지높이(Sh)[6]를 측정하여 비교하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 고체윤활제 적용전과 적용후의 플래지 두께 마모량과 플래지 구배 마모율의 변화비를 보여준다. 이를 정리하면 Table 1과 같으며 이에 따라 고체윤활제 적용 후에 평균적으로 플래지 두께 마모율은 2.6배 감소하였으며, 플래지 높이는 2.1배 증가하였다.

Table 1. Comparison of wear rate with and w/o solid lubricant

	플랜지 두께(Sd) (비적용시/적용시)	플랜지 높이(Sh) (적용시/비적용시)
동력차 왼쪽	3.2	1.4
동력차 오른쪽	2.4	1.7
객차 왼쪽	2.7	2.5
객차 오른쪽	2.3	2.8
평균	2.6(감소)	2.1(증가)

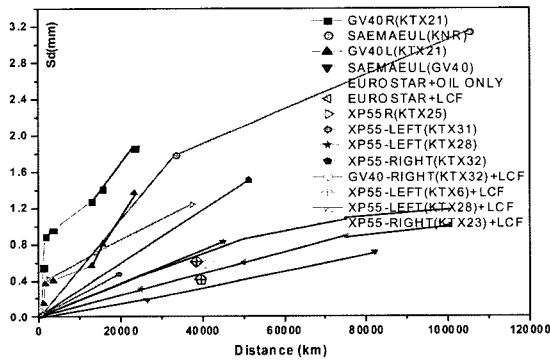


Fig. 12. Evolution of flange thickness wear depending on running distance.

Fig. 12는 고체윤활제 적용 전·후에 주행거리에 따른 플랜지 두께 마모량 변화 추이를 나타내며, 고체윤활제를 적용하기 전에는 열차마다 차이는 있지만 마모량 진전이 매우 급하게 변화하지만 고체윤활제를 적용한 후 플랜지마모가 유로스타의 변화 추이[7]와 유사하게 진행되고 있다. Table 2는 고체윤활제 적용 후(평균 주행거리 43,335 Km)에 시험차량의 평균마모율과 마모한도까지 주행거리를 나타내는데, 플랜지 두께보다는

플랜지 높이에 의하여 먼저 마모한도에 도달한다는 결과가 나왔다. 그러나 실제 주행시에는 차륜형상에 의한 삭정 뿐만 아니라 담면부에 나타나는 여러 결함들에 의해서도 삭정이 시행되므로 실제 삭정주기는 담면부 표면상태에 따라서 결정된다. Fig. 13~Fig. 15는 최초 측

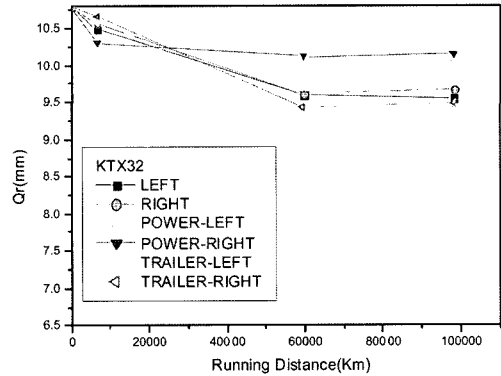


Fig. 13. Flange gradient depending on running distance.

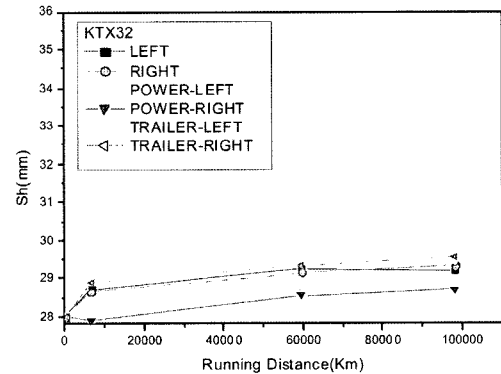


Fig. 14. Flange height depending on running distance.

Table 2. Average wear and wear limitation of test train after 43,335 km running

	GV40(동력차)		왼쪽 차륜			오른쪽 차륜		
	플랜지 두께(Sd)	플랜지 높이(Sh)	플랜지 구배(Qr)	플랜지 두께(Sd)	플랜지 높이(Sh)	플랜지 구배(Qr)		
마모변수								
마모량(mm)	0.25 ↓	-0.67 ↑	-0.19 ↑	0.35 ↓	-0.79 ↑	-0.23 ↑		
마모율(10 ⁻⁶ mm/Km)	5.84	-15.73	-4.37	8.22	-18.72	-5.05		
마모한도까지 주행거리(Km)	1,284,246	508,582	-912,409	427,350	-	-		
	XP55(객차)		왼쪽 차륜			오른쪽 차륜		
마모량(mm)	0.38 ↓	-0.56 ↑	-0.02 ↑	0.46 ↓	-0.06 ↑	-0.06 ↑		
마모율(10 ⁻⁶ mm/Km)	8.84	-13.26	-0.82	10.52	-15.44	-1.50		
마모한도까지 주행거리(Km)	848,416	603,318	-712,928	518,135	-	-		

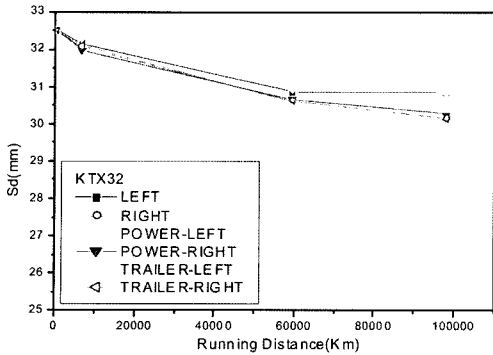


Fig. 15. Flange thickness depending on running distance.

정시부터 현재까지 KTX32호의 차륜마모변수 변화를 보여준다. 플랜지 구배와 플랜지 두께는 고체윤활제 사용 후 마모율이 현저히 감소한 후 변화가 없으며, 플랜지 높이는 변화율이 완만하게 증가하였다. 플랜지 두께 감소는 고체윤활제의 효과이나, 플랜지 높이는 고체윤활제의 효과라기보다는 담면부 마모의 진전에 의해 우묵하게 패인 현상이 진행되면서 플랜지 높이가 증가한 것이다.

특히, 고체윤활제가 지속적으로 사용되면 레일 게이 지코너부위와 차륜 플랜지 부위에서 고체윤활제의 코팅효과로 인한 윤활막이 유지됨으로 해서 차륜과 레일 사이의 마찰계수가 감소하여 플랜지마모 감소와 마찰력 감소에 따른 주행에너지 절감효과도 기대된다.

3-2-2. 스틱의 마모량

Fig. 16은 고체윤활제 스틱의 마모량을 보여준다. 적용 초기에는 급격하게 마모가 발생하지만 스틱 1개 정도가 마모된 후는 스틱 마모율이 감소하는데 이는 차륜과 레일의 표면에 고체윤활제가 코팅이 되어 윤

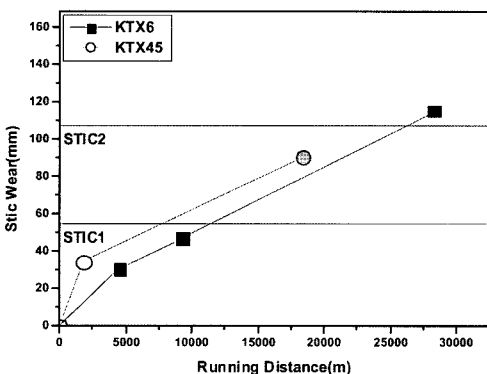


Fig. 16. Stick wear depending on running distance.

활제로서의 기능을 하게 되면 스틱의 마모량도 줄어들고 마모율도 안정화되기 때문이다[8]. 스틱의 교환을 위해서 작업시간이 필요한데 5만~5만5천km 마다 수행되는 체계검수[9]시에 교환토록 하는 것이 유지보수 효율을 높일 수 있으므로 이 정도의 수명이 권장된다.

4. 결 론

본 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 궤도 검측데이터를 활용한 마모지수 해석에서 궤도틀림 변화 중 캔트와 궤간의 영향을 분석하였으며 궤간이 좁아진 경우 플랜지 마모가 증가 될 수 있다. 캔트를 조정하여 마모지수를 감소시킬 수는 있으나 설정캔트 150 mm를 적용했을 때 곡선반경 600 m이하의 급곡선 구간에서는 그 영향이 곡선반경으로 인한 플랜지 마모상태를 정상마모 수준으로 감소시킬 정도로 크지 않았다.

2. 기존선 곡선부 주행시 곡선반경 변화에 따른 플랜지마모의 영향이 가장 크므로 고속열차시스템의 변경없이 고체윤활제를 적용한 성능시험을 통하여 측정된 차륜담면 형상을 가지고 계산했을 때 고체윤활제 적용시 오일도유기만 사용한 경우보다 평균 플랜지 두께 마모량은 2.6배 감소하였고 플랜지 구배(Qr)의 경우는 담면부 마모로 인하여 기준점이 낮아지면서 오히려 증가하였다.

3. 현재의 마모패턴으로 마모가 진행될 경우 차륜 담면 형상 유지보수 기준에 따르면 마모한도에는 플랜지 높이가 가장 먼저 도달하며 삭정주기는 427,350 Km이다. 차륜 찰상이나 박리 등 돌발적인 결함에 의해 삭정주기는 더 감소된다.

4. 고체윤활제의 평균마모량은 약 1만km/스틱이다. 설치된 고체윤활제의 경우 플랜지 마모량과 스틱 마모량이 정상상태에 도달하면 고체윤활제 마모량은 더 감소한다.

참고 문헌

1. McEwen, I.J. and Harvey, R.F., "Full-scale wheel-on-rail wear testing : comparisons with service wear and a developing theoretical predictive method," *Lubrication Engineering*, Vol.41, pp.80-88, 1985.
2. Perace, T.G. and Sherratt, N.D., "Prediction of wheel profile wear," *Wear*, 150, pp.355-365, 1991.

3. Eickhoff, B, Scott, G, Pearce, T. and Evans, J., "Vampire User's Manual," Oct. 1993.
4. 한국철도기술연구원, "차륜/레일 마모예측 및 유지보수 기준연구," 1999.
5. 한국철도기술연구원, "KTX 차륜의 최적마모 관리방안 연구," 2003.
6. Greenwood Engineering, "Miniprof for Windows User's Guide," 1997-1999.
7. Mayger, J. and Richards, S.P., "Eurostar Flange Wear," IMechE, Design, Reliability, and Maintenance for Railways, pp.99-110, 1996.
8. Ma Yixuan, Zhao Dequan, Zhang Ruijun, Jin Yuansheng, "Laboratory and Field Evaluation on Tribological Behaviors of LCF WHEEL Flange Solid Lubricant," National Tribology Laboratory, Tsinghua University, 2000
9. 철도청, "고속철도차량유지보수지침서," 2003.