

고속철도 차륜담면의 마모 특성에 관한 연구

A Study on the Wear Characteristics of Wheel Profile for High Speed Rolling-stock

허현무* · 유원희*

Hyun-Moo Hur · Won-Hee You

Abstract

Through a year's commercial operation, Korea High Speed Railway has solved defectives from several breakages at the beginning and is going into the stage of stable operation. Among issues, wheel wear becomes a matter of primary concerns in view of vehicle's stability and maintenance. It was understood as above that wear status has been improved in the test by which railway system including vehicles and tracks was stabilized during a year's commercial operation, comparing to that with excessive wear in the trial operation prior to opening to the public. To make out wheel's wear status and characteristics of equivalent conicity at present when the service has been introduced a year ago and the average cumulative mileage of vehicles reach almost 500,000km, wheel's wear types were analyzed with the current vehicles in service.

Keywords : Wheel Profile(차륜담면형상), Wear Characteristic(마모특성), High Speed Rolling-stock(고속철도차량)

1. 서론

개통이래 1년여 간의 영업운용을 거친 고속철도차량은 개통초기 일부 고장으로 인한 결함을 해결하고 안정적인 운용단계로 진입하고 있다. 그 중 차륜담면의 마모관리에 대한 문제는 차량의 안정성, 유지보수와 관련되어 주요한 관심사항이 되고 있다. 고속철도차량 운용전 시운전시 과도한 차륜마모가 발생하였던 영업운행전과 1년간의 영업 운용에 따라 차량, 궤도등 철도시스템의 안정화가 기해진 현재의 시험에서의 차륜의 마모 현황은 상이하다고 할 수 있다. 따라서 1년간의 영업운용, 차량당 약 500,000km의 누적주행거리를 기록한 현시점에서 고속철도차량 차륜의 마모 현황 및 등가담면구배 특성을 파악하기 위하여 영업 운용중인 차량을 표본으로 하여 주행거리에 따른 차륜의 마모유형을 분석하였다.

2. 시험 개요

2.1 현차 차륜담면형상 측정시험

고속철도차량의 차륜의 마모특성을 분석하기 위하여 현 운용중인 영업차량을 대상으로 차륜의 담면형상을 계측하였다. 고속철도차량에 적용되고 있는 차륜 담면형상은 Fig. 1과 같이 2종류이며 담면구배 1/40인 GV40담면은 동력대차에 적용되고 있으며 담면구배 1/20인 XP55담면은 객차대차에 적용되고 있다. 차륜의 담면형상 측정은 Table 1과 같이 5량의 차량을 표본으로 하여 각 시험차 전체 차륜 92 개에 대하여 차륜의 담면형상을 측정하였다.

차륜담면형상 측정은 Fig. 2와 같이 덴마크 Greenwood Eng.사의 MINIPROF Wheel형상측정기를 사용하였다. 차륜형상측정모듈과 휴대용 컴퓨터로 구성되어있으며 측정분해능은 최대 0.01mm이다. 측정방법은 차륜담면형상 표면의 이물질들을 제거하고 측정센서를 플랜지내면에 밀착시켜 고정하고, 초기화시킨 후 플랜지내면으로부터 차륜담면 끝까지 접촉 밀착하여 측정한다[1].

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원
E-mail : hmhur@krti.re.kr

TEL : (031)460-5245 FAX : (031)460-5289

* 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

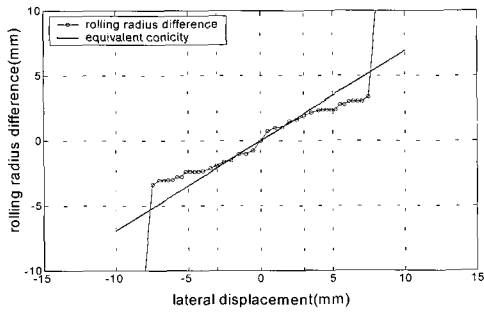


Fig. 5. Equivalent conicity from wheel/rail contact analysis

을 수행하여 구한 접촉점 분포의 일례를 나타낸다. Fig. 5는 접촉점 해석을 통하여 윤축 좌우 횡변위에 대한 좌우차륜의 구름반경차(rolling radius difference)를 구하고 이 선도로부터 일차함수로 모델링하여 구한 등가담면구배 산출 사례를 나타낸다.

3. 차륜담면 마모 특성

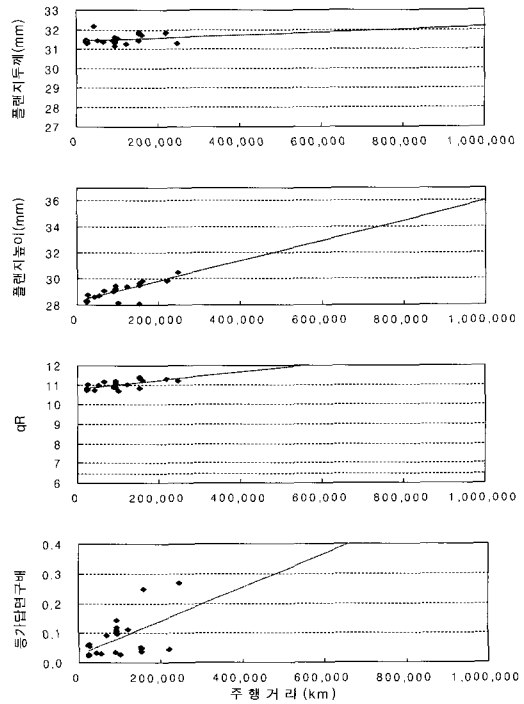
표본차량 전체 차륜을 대상으로 하여 고속선 전용차량과 기존선 혼용차량, 동력대차 적용차륜(동력차륜)과 객차대차 적용차륜(부수차륜), 고체도유기 취부차륜(도유차륜)과 취부하지 않은 차륜(비도유차륜)으로 구분하여 주행거리에 대한 마모 특성을 분석하였다.

3.1 운용선로에 따른 마모 특성

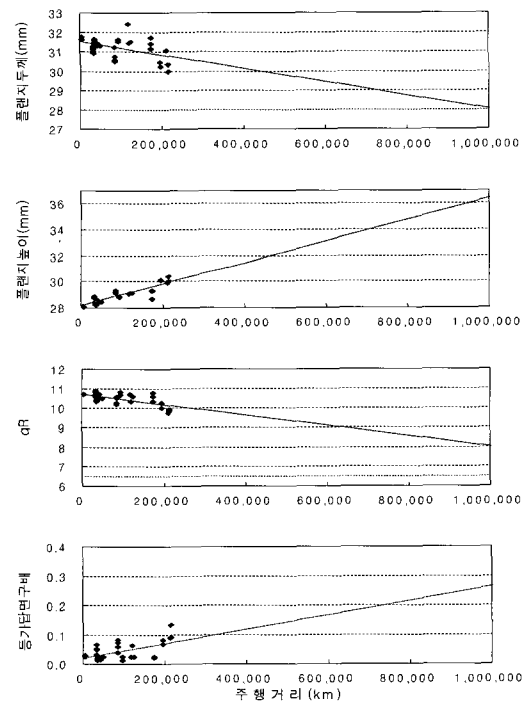
주운용구간이 고속선구간인 서울~동대구 구간에 집중된 차량(고속선 전용차량)과 부산, 목포까지 기존선을 포함한 고속철도 영업운전 전 구간에 운용된 차량(기존선 혼용차량)간의 담면형상을 분석하였다. GV40담면을 적용하고 있는 동력차륜의 경우, Fig. 6(b)과 같이 기존선 혼용차량은 주행거리의 증가에 따라 플랜지두께, qR, 등가담면구배는 감소, 플랜지높이는 증가하는 정상적인 마모유형을 보임에 비하여 고속선 전용차량은 Fig. 6(a)과 같이 플랜지두께, qR이 주행거리에 따라 오히려 증가하고 있는 경향을 보이고 있다. 또한 고속선 전용차량의 등가담면구배 분포도 기존선 혼용차량의 등가담면구배 분포에 비하여 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

XP55담면을 적용하고 있는 부수차륜의 경우도 Fig. 7과 같이 동력차륜과 유사한 경향을 나타내어, 고속선 전용차량의 플랜지두께, qR, 등가담면구배 분포가 기존선 혼용차량의 분포에 비하여 크고 산만하게 나타나고 있다.

이는 Fig. 8과 같이 고속선 전용차량에서 측정된 차륜담



(a) wheels operating on high speed line



(b) wheels operating on high speed line and conventional line

Fig. 6. Wheel wear characteristics of power car

면의 마모형상 일례를 보면 답면부의 움푹 파인 마모형상을 보이는 hollow 마모형태를 띄고 있음에 비롯된다고 할 수 있다. 즉, 기존선 혼용구간은 고속선선과 기존선 구간이 혼용되어 전 운용구간중 곡선부 비율이 높다. 이로 인하여 레일에 대한 차륜의 접촉위치가 곡선구간 주행시에는 차륜플랜지부로 집중되며, 직선구간 주행시에는 차륜답면 중앙부로 분포하게 되어 차륜플랜지부에서 답면끝단부까지 골고루 접촉하게 된다. 반면에 고속선 전용구간은 선형이 평탄한 고속선선구간에 한정돼 있고 이로 인하여 레일에 대한 차륜의 접촉점은 주로 차륜답면부 중앙에 집중 분포하게 된다. 따라서 기존선 혼용구간 운용 차량에 비하여 차륜답면부 중앙이 집중적으로 마모되는 hollow 마모 특성을 보이고 있다고 사료된다.

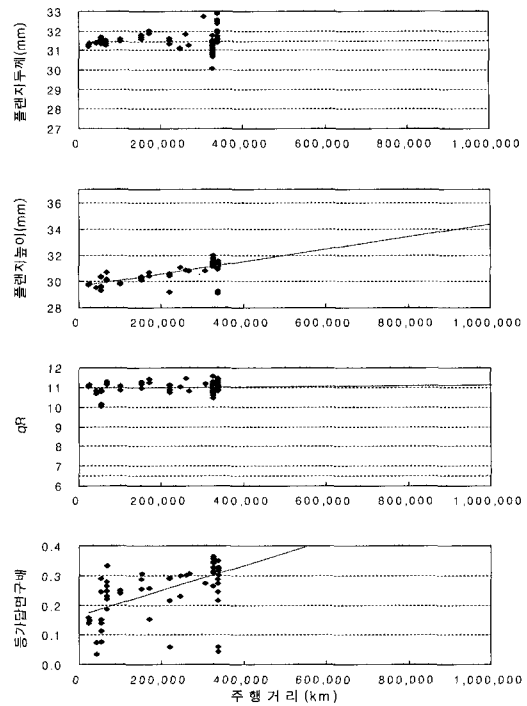
이러한 마모유형은 차륜답면의 비정상적인 마모형태라 할 수 있다. 이를 치수 변화로 분석하면 Fig. 3의 차륜치수 좌표계에 의거 차륜답면형상 치수 분석시, Fig. 8과 같이 답면 hollow 마모에 따라 차륜치수 측정의 기준선이 O1에서 O2로 하향하게 된다. 이는 플랜지두께, qR값 산출 기준점을 C1에서 C2로 이동시킴으로서 플랜지두께(e)를 e1에서 e2로, qR값을 qR1에서 qR2로 증가시키게 된다. 또한, 레일과의 기하학적 접촉해석시 윤축의 횡변위에 따른 좌우차륜 구름반경차를 크게 하여 등가답면구배가 크게 나타나는 결과를 초래한다. 결국, 등가답면구배 관리측면에서 일정한 기준치 이하로 등가답면구배를 관리하기 위하여 차륜삭정 시기를 설정한다면 고속선 전용차량의 차륜삭정 주기가 기존선 혼용차량에 비하여 더 단축될 수 있음을 예측할 수 있다.

따라서 차륜답면의 마모형상 측면에서만 보면 고속선 전용차량의 마모형태가 기존선 혼용차량의 마모형태에 비하여 취약한 마모 특성을 보이고 있다고 판단된다.

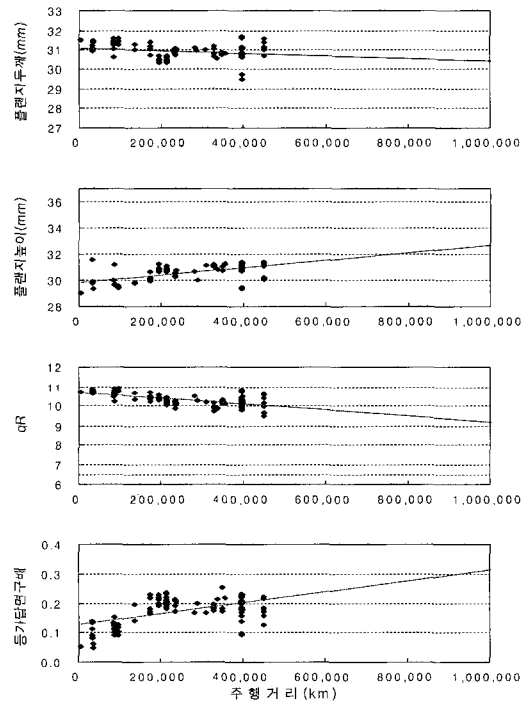
3.2 현 영업차량 차륜의 삭정 한도 검토

영업선에서 통상적으로 운용되고 있는 차량이라 할 수 있는 기존선을 포함한 고속철도 영업운전 전 구간에 운용되고 있는 기존선 혼용차량의 차륜마모특성을 차륜삭정관리측면에서 분석하였다. Fig. 6(b), Fig. 7(b)에서와 같이 기존선 혼용차량의 동력차륜과 부수차륜의 주행거리에 따른 마모형태는 정상적인 마모형태를 보이고 있으며 마모량이 미미함을 알 수 있다. 이는 액상도유기 및 고체도유기 혼용, 차량 및 궤도의 안정화 등으로 시운전 초기 발생하였던 과도한 마모현상이 크게 개선되었음을 나타낸다.

동력차륜과 부수차륜의 마모현황을 비교하여 보면, 전반적으로 동력차륜의 마모추이가 부수차륜에 비하여 크게 나타나는 경향을 띄고 있다. 이는 차륜의 답면형상, 견인력 및



(a) wheels operating on high speed line



(b) wheels operating on high speed line and conventional line

Fig. 7. Wheel wear characteristics of trailer car

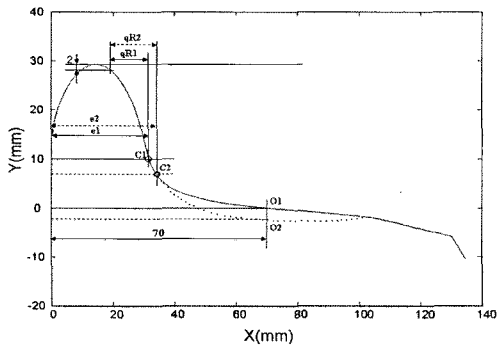


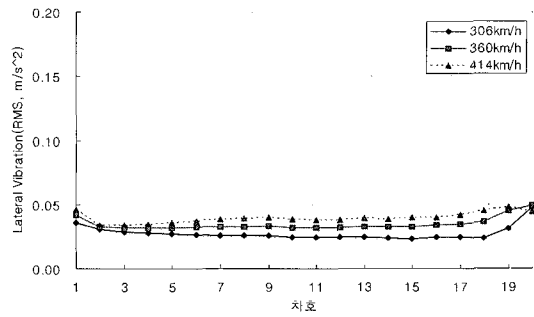
Fig. 8. Wear pattern of a wheel operating on high speed line

제동력 작용등 차륜/레일간 하중 작용조건이 상이한 점에서 비롯된 것으로 추정된다. 차륜의 삭정관리측면에서 보면 동력차륜과 부수차륜 모두 최대 450,000km 주행시까지도 차륜의 삭정한도(플랜지두께 28mm, 플랜지높이 36mm, qR 6.5)에 도달하는 데이터는 발생하지 않고 있다. 또한 등가담면구배도 고속철도차량의 통상적인 허용치로 적용하는 0.3을 상회하는 데이터는 발생하지 않았다. 부수차륜의 등가담면구배가 동력차륜에 비하여 크게 나타나고 있는데, 이는 1/20구배 XP55담면을 적용한 부수차륜의 담면형상특성에 기인한다고 할 수 있다.

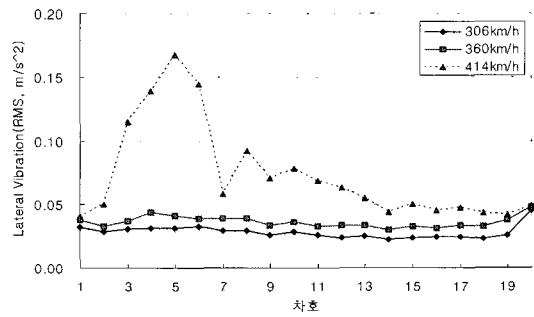
따라서, 현재까지의 차륜담면형상 측정데이터 분석결과로 볼 때, 차륜의 마모로 인한 삭정 유발요인은 현 450,000 km 주행 시까지는 발생되지 않고 있음을 알 수 있다. 이는 현장에서의 차륜 삭정요인을 살펴보아도 박리, 찰상, 진원도 불균형으로 인한 삭정요인이 대부분임이 이를 뒷받침 한다고 할 수 있다. 등가담면구배 관리측면에서 보면 등가담면구배 0.3으로 관리한다고 가정하였을 때, 삭정주기는 500,000 km를 상회 할 것으로 추정된다. 좀 더 정확한 삭정주기 도출을 위해선 추가적으로 주행거리 증가에 따른 마모유형을 지속적으로 추적 분석할 필요가 있다. 또한, 차륜의 효율적 등가담면관리를 위해선 삭정주기를 제시하기 보다는 등가담면구배 측정 전용장비를 개발하여 현장에 적용하고 기준치를 초과하는 차륜에 대하여 선별적으로 삭정 관리함이 효율적인 것으로 판단된다.

4. 마모차륜 적용 차량동특성 해석

영업운용에 따라 마모된 차륜을 대상으로 고속철도차량의 안정성 및 동특성에 대한 해석을 수행하였다. 차륜담면이 원형조건으로 해석한 case1(동력차륜: GV40원형담면, 부수차륜: XP55원형담면)과 46개 윤축의 담면형상이 마모



(a) case1



(b) case2

Fig. 9. Results of Stability analysis

로 인하여 모두 상이한 실측 마모차륜조건으로 해석한 case2(동력차륜: GV40마모담면, 부수차륜: XP55마모담면)를 대상으로 비교 해석을 수행하였다.

차량동특성 해석은 철도차량 동특성해석 전용프로그램인 영국 AEAT사의 VAMPIRE을 활용하였으며 고속철도차량 20량을 대상으로 모델링하였다[4]. 차륜/레일간 기하학적 접촉 조건은 차륜내면거리 1355mm, 궤간 1435mm, 레일경좌 1/20인 UIC 원형레일을 대상으로 하였으며 차량하중은 공차조건으로 모델링하였다. 안정성 해석을 위하여 횡방향 외란에 대한 안정성을 파악하는 비선형 과도응답해석인 hunting 해석기법을 적용하였으며, 진동특성 해석을 위하여 고속선 실선로 일부 구간을 모델링하여 마모차륜조건에 의한 동특성 영향을 분석하였다.

Fig. 9는 원형(case1) 및 마모차륜 조건(case2)에 대하여 차량안정성 해석을 수행한 결과이다. 각 차체의 횡방향 진동의 RMS값을 속도 증가에 따라 나타난 선도이다. case1의 원형담면 조건에서 보면 400km/h 이상의 속도조건하에서도 고속철도차량의 흔들림 허용기준인 $0.183m/s^2$ 에 비해선 매우 낮은 수치를 나타내고 있어 횡방향 불안정은 발생하고 있지 않음을 알 수 있다. 이는 고속철도차량의 임계속도조건인 원형차륜담면, 100% 댐핑조건하에서 임계속도가 400km/h

이상이어야 한다는 안정성 조건을 충족하고 있음을 나타낸다.

그러나 case2의 마모차륜담면 조건하에서는 속도가 360 km/h 초과 대역에서는 일부 차체의 횡진동이 크게 증가함을 보이고 있다. 이는 Fig. 10의 측정차량 전체 윤축에 대한 등가담면구배를 산출한 결과에서 보면, 일부 윤축의 등가담면구배는 고속철도차량 안정성관련 통상적인 허용치로 적용하고 있는 0.3을 초과하고 있음을 알 수 있고 이로 인하여 속도 증가에 따라 사행동에 대한 안정성이 저하할 가능성이 있다고 판단된다. 그러나 불안정 발생 속도대역이 360km/h 대역을 상회하는 영역으로 실제 고속철도차량의 영업 최고 속도인 300km/h범위에서는 충분한 안정성을 확보하고 있다고 할 수 있다.

또한, Fig. 11은 고속철도 고속선 실선로 일부 구간을 대상으로 하여 속도 300km/h 주행 시 횡방향 진동특성을 해석한 결과이다. 원형차륜담면 조건인 case1에 비하여 마모차륜담면 조건인 case2에서 진동가속도가 다소 증가함을 알 수 있다. 그러나 고속철도차량의 흔들림 허용기준인 $0.183 m/s^2$ 에 비해서 매우 안정된 특성을 보이고 있다고 할 수 있

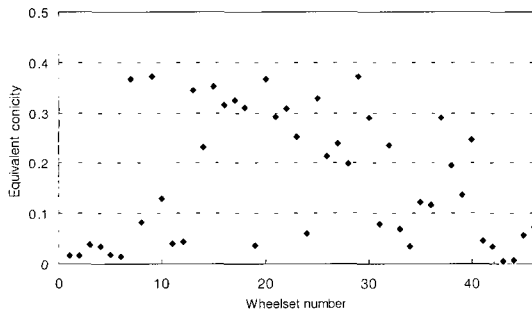


Fig. 10. Equivalent conicity of measured wheel profiles

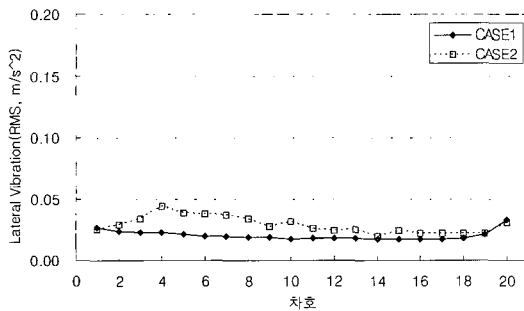


Fig. 11. Results of lateral vibration analysis

으며, 따라서, 약 400,000km의 누적주행거리를 기록한 현재, 누적주행거리 증가에 따라 차륜 마모로 인한 차량 안정성에 영향을 미치는 불안정 요인은 발생되고 있지 않다고 판단된다.

5. 결론

고속철도차량의 안정성 및 효율적 유지보수를 위하여 영업용중인 고속철도차량을 대상으로 차륜의 마모 특성 분석을 위한 실험적 연구를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 차륜담면의 마모형상 및 등가담면구배 측면에서만 보면 기존선 혼용차량의 마모형태가 고속선 전용차량의 마모형태에 비하여 양호한 마모특성을 보이고 있다고 판단된다.
- (2) 기존선 혼용차량의 주행거리에 따른 차륜마모형태는 정상적인 마모형태를 보이고 있으며 마모량이 미미하였다. 이는 시운전 초기 발생하였던 과도한 마모현상이 크게 개선되었음을 나타내는 결과로 액상도유기 및 고체도유기 혼용, 차량 및 궤도의 안정화 등에서 비롯된 것으로 사료된다.
- (3) 약 400,000km 누적주행거리를 기록한 현재, 영업차량의 마모된 차륜담면을 측정, 모델링하여 차량의 안정성을 해석한 결과, 차륜의 마모로 인한 차량 안정성에 영향을 미치는 불안정 요인은 발생되고 있지 않다고 사료된다.
- (4) 차륜의 마모로 인한 악성 유발요인은 매우 미미하며, 등가담면구배관리 측면에서 적정 악성주기 도출을 위해서는 누적 주행거리 증가에 따른 마모유형을 추적 분석하는 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 허현무 외, “경제적 차륜담면관리기술 개발 3차년도 최종보고서”, 철도청, 2004
2. “Calculation of Equivalent Conicities for the S1002 Wheel Profile on UIC60 Rails”, ERII Report DT54/E
3. 허현무, 이찬우, 권성태, 윤춘한, “기존선 차륜담면형상의 마모패턴 분석”, 철도학회춘계학술대회논문집, 2003, pp.651-655
4. Vampire User’s Manual. AEA Technology, 2003