

전동차 차륜담면 마모에 따른 차량 진동 특성 영향 분석

An Analysis on the Influence of Wheel Flange Wear on the Vibration of EMU

허현무[†] · 박준혁* · 유원희* · 박태원** · 양철식***

Hyun-Moo Hur · Joon-Hyuk Park · Won-Hee You · Tae-Won Park · Chil-Sig Yang

Abstract We have conducted an experimental study to analyze characteristics of the wheel profile wear and an influence of the wheel flange wear on the vehicle's vibration characteristics. In experiment with EMU, wheel profile wear is severe at the beginning of the commercial operation. In this stage, the variations of the wheel dimension parameters and equivalent conicity is changed rapidly. Along with a mileage of the test vehicle, the wear of the wheel flange is increased and also the vibration level of the car-body is increased. The peak-peak mean value of the body vibration is estimated as good level, but the level is approached at the limit of the good level as mileage increases. Especially, the peak-peak maximum value of the body vibration shows the distinct increase of vibration level.

Keywords : Wheel Profile, Wear, Vehicle Vibration, EMU

요 지 전동차 차륜에 대한 마모 특성과 차륜의 마모가 차량 진동특성에 미치는 영향을 분석하고자 도심 곡선구간에서 운용되는 전동차를 대상으로 실험적 연구를 수행하였다. 차륜담면의 마모는 차륜 원형삭정 후 주행 초기(30,000km 이하)에 차륜 치수 및 등가담면구배 변화가 심한 직립마모 특성을 보이고 있다. 시험차의 누적주행거리가 증가함에 따라 차륜의 마모가 진전되고 그에 따른 차체의 진동 수준은 증가하는 경향을 보이고 있음을 확인하였다. 차체 진동 평균은 좌우, 상하방향 모두 “양호” 수준으로 평가되고 있으나 누적주행거리 증가에 따라 증가하여 “양호” 구간의 한계치에 이르고 있다. 특히, 차체 진동 최대값은 더욱 뚜렷한 증가 특성을 보이고 있으며, 이는 불균일한 진동 발생 가능성이 커진다고 예측할 수 있다.

주 요 어 : 차륜담면형상, 마모, 차량 진동, 전동차

1. 서 론

철도차량의 고유 특성인 차륜과 레일의 접촉현상은 차량의 동적 거동에 영향을 미치는 것으로 알려지고 있으며, 특히 차륜담면의 형상은 차량의 직선 및 곡선구간의 주행 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 신차 제작시나 운용선로 변경 시엔 차량/궤도와 의 연관관계 검토측면에서 우선적으로 검토되어야 할 항목이다. 한편, 국내 전동차와 같이 곡선비중이 많은 선로에서의 차량 운용은 차륜의 과도한 마모를

초래하고 이는 유지보수측면에서는 차륜의 조기 삭정, 관련 차량 구성품의 유지보수 주기 단축 등의 문제로 귀결되며 동시에 궤도 유지보수에도 악영향을 초래한다. 특히 차륜의 마모는 차량의 안정성이나 동적 거동과 같은 동특성에 영향을 미쳐 차량의 균일한 주행 성능 확보 차원에서도 관심의 대상이 되고 있다[1-3].

따라서 본 논문에서는 전동차 차륜에 대한 마모 특성 분석과 차륜의 마모가 차량 동특성에 미치는 영향을 분석하고자 곡선구간 빈도가 높은 도심구간에서 운용되는 차량을 대상으로 실험적 연구를 수행하였다. 시험대상차를 선정하여 차륜의 담면형상과 차체에 대한 진동특성 계측시험이 주기적으로 수행되었다. 누적주행 거리에 따른 차륜담면형상 계측 데이터와 차량 진동특성 실험데이터에 대한 결과 분석이 이루어졌으며 이에 대한 주요 결과를 본 논문에서 소

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 주행추진연구실
E-mail : hmhur@krti.re.kr

TEL : (031)460-5245 FAX : (031)460-5299

* 한국철도기술연구원 주행추진연구실

** 아주대학교 기계공학과

*** 서울특별시도시철도공사 차량지원팀

개하고자 한다.

2. 전동차 차륜 마모, 동특성 시험

2.1 시험 개요

주행거리 누적에 따른 차륜의 마모와 그에 따른 차량 동특성 영향 분석을 목적으로 도시형 전동차를 대상으로 현차 시험을 수행하였다. 시험차는 차량 상태를 중수선 수준으로 보수 완료한 차량 1편성을 대상으로 하였다. 운용 노선은 60kg 레일이 적용된 급곡선 빈도가 높은 도심구간으로 운용토록 하였으며 운행조건은 정상 영업운행 조건으로 하였다. 시험기간은 시험차량으로 지정된 영업운행 시점으로부터 4차 시험일까지 12개월 이상이었으며 시험 개시 후 총 누적주행거리는 약 113,911km 이다. 차륜의 마모 및 차량 동특성 계측은 3개월 단위로 시험 대상차에 대하여 수행하였으며 계측 항목 및 시험차의 누적주행거리는 Table 1과 같다.

Table 1. Test outline

구분	내역
시험차	<ul style="list-style-type: none"> - 전동차(T-car) - 차량검수상태: 중수선 수준 - 신조 차륜, 원형 삭정 - 차륜담면구배: 1/20
측정량	<ul style="list-style-type: none"> - 차륜담면형상 <ul style="list-style-type: none"> · 계측장치: MINIPROF wheel gage - 시험차 전차륜 계측 - 진동가속도 <ul style="list-style-type: none"> · 계측장치: 진동가속도센서, Amp, Daq. · 측정개소: 대차중심 상부 차체 바닥
누적주행거리	<ul style="list-style-type: none"> - 1차: 0km, 2차: 27,206km - 3차: 60,879km, 4차: 113,911km

2.2 차륜담면형상 계측

시험차의 차륜은 신조 차륜으로 교체하였으며 차륜담면형상은 Fig. 1과 같이 국내 전동차에 적용하고 있는 1/20구배 차륜담면형상으로 원형 삭정하였다. 차륜담면형상 계측은 Fig. 2와 같이 MINIPROF Wheel Profile Gage를 이용하였다. 차륜측정센서부와 컴퓨터로 구성되며 접촉식으로 최대 0.01mm의 분해능을 보유하고 있다. Fig. 3은 시험차에 대한 차륜 번호를 나타낸다.

2.3 차량 진동 계측

차량 진동 계측은 “도시철도성능시험기준 진동시험규격”에 의거하여 진동가속도 센서와 계측시스템을 구성하였다[4]. 시험규격에 의거하여 진동가속도센서 측정개소는

대차중심 상부 차체 바닥으로 하였으며 시험차 운용선로 상에서 영업운행에 준하는 주행속도로 시험하였다. Fig. 4는 차체 바닥에 취부한 진동가속도 센서를 나타내며 Fig. 5는 진동 계측시스템을 나타낸다.

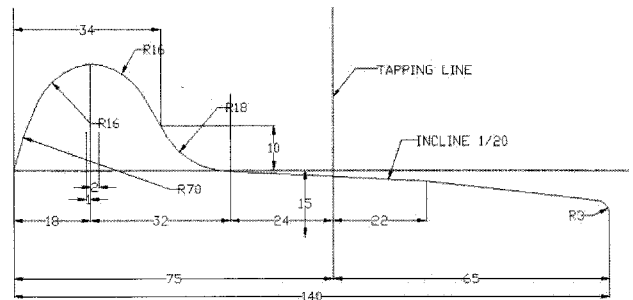


Fig. 1. Wheel profile for EMU

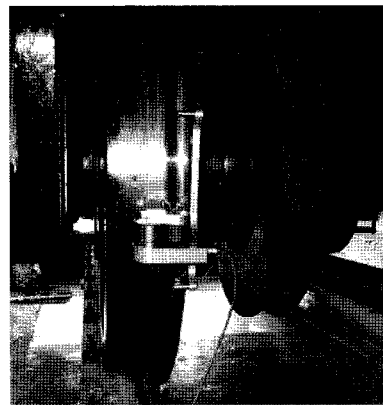


Fig. 2. Wheel profile gage

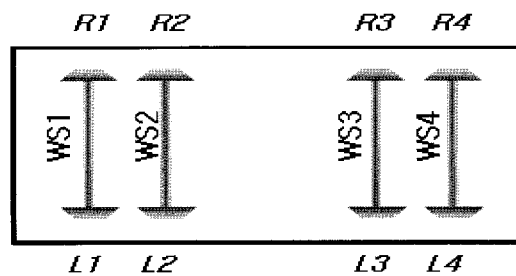


Fig. 3. Wheel numbering

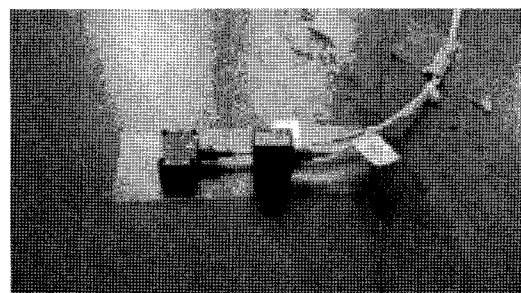


Fig. 4. Accelerometer

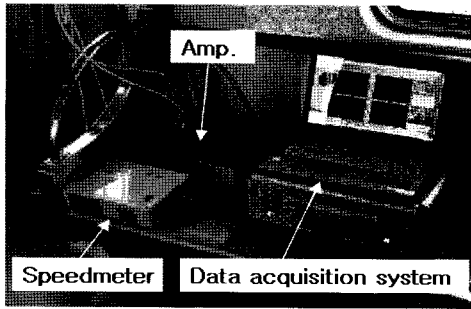


Fig. 5. Vibration measuring system

3. 차륜 마모특성 분석

3.1 차륜 치수 변화

시험차의 누적주행거리 증가에 따라 차륜의 마모로 인한 답면형상 변화를 분석하였다. 답면형상 변화는 Fig. 6과 같이 초기 형상에 비교하여 플랜지두께 FT(mm), 플랜지높이 FH(mm), 플랜지경사각(deg)과 같은 차륜 치수 인자에 대하여 분석하였다.

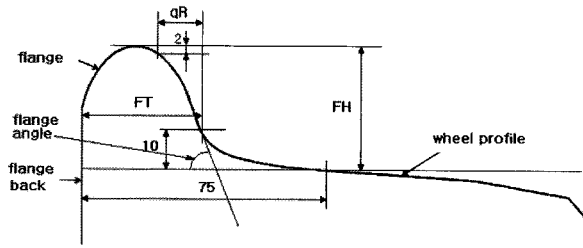


Fig. 6. Wheel dimension parameter

Fig. 7은 측정일에 따라 차륜답면의 마모 유형을 보여주는 사례이다. 초기 원형에 비하여 주행거리가 누적됨에 따라 플랜지의 마모가 진전되고 있음을 보이고 있다. Fig. 8은 측정 전 차륜에 대한 플랜지두께 변화를 나타내는 그림이다. Fig. 9는 플랜지높이 변화를 나타내며 Fig. 10은 플랜지경사각 변화를 나타낸다.

각 차륜마다 편차가 있으나 2차측정 데이터가 초기 원형상태에 비하여 플랜지두께, 플랜지경사각 변화가 심함을 보이고 있다. 이러한 경향은 Fig. 11에서와 같이 누적주행거리 증가에 따라 차수별로 측정된 차륜답면형상의 치수 평균치 변화를 보면 명확히 알 수 있다.



Fig. 7. Wheel wear sample

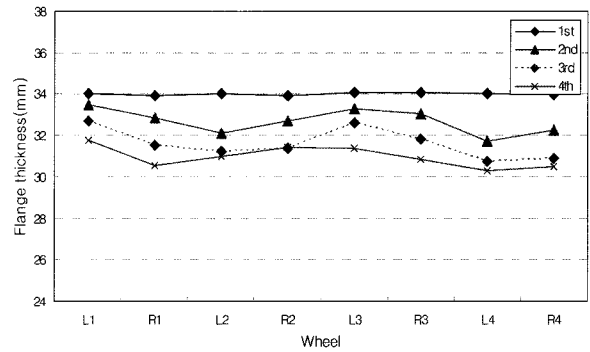


Fig. 8. Variation of the wheel flange thickness

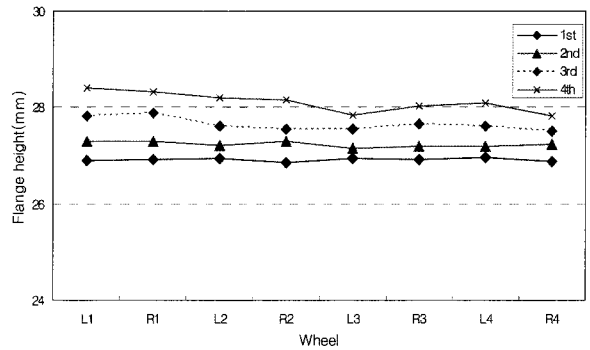


Fig. 9. Variation of the wheel flange height

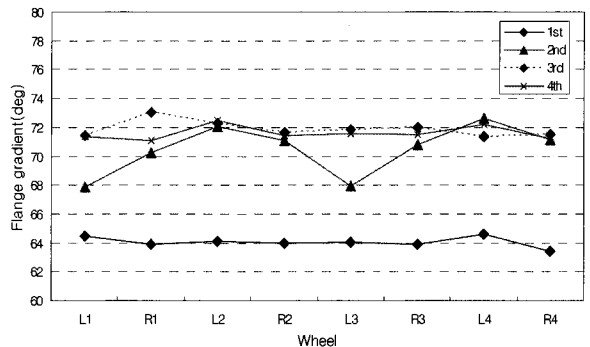


Fig. 10. Variation of the wheel flange gradient angle

누적주행거리 113,911km 주행 시 차륜 플랜지두께 변화는 34.0mm에서 31.0mm로 평균 3mm의 두께 변화를 나타내고 있으며 플랜지높이 변화는 26.9mm에서 28.1mm로 평균 1.2mm의 높이 변화를 나타내고 있다. 플랜지경사각 변화는 64.1°에서 71.6°로 평균 7.5°의 경사각 변화를 나타내고 있다.

따라서 차륜답면의 마모 형상 변화로 볼 때 차륜 원형상정 후 주행 초기(30,000km 이하)에 차륜 플랜지두께 및 플랜지경사각 변화가 심한 직립마모 특성을 보이고 있다고 할 수 있다. 이는 직선 고속주행특성에 비하여 곡선주행특성이 취약한 원추형 1/20구배답면의 전형적인 마모 특성을 보이고 있다고 사료된다.

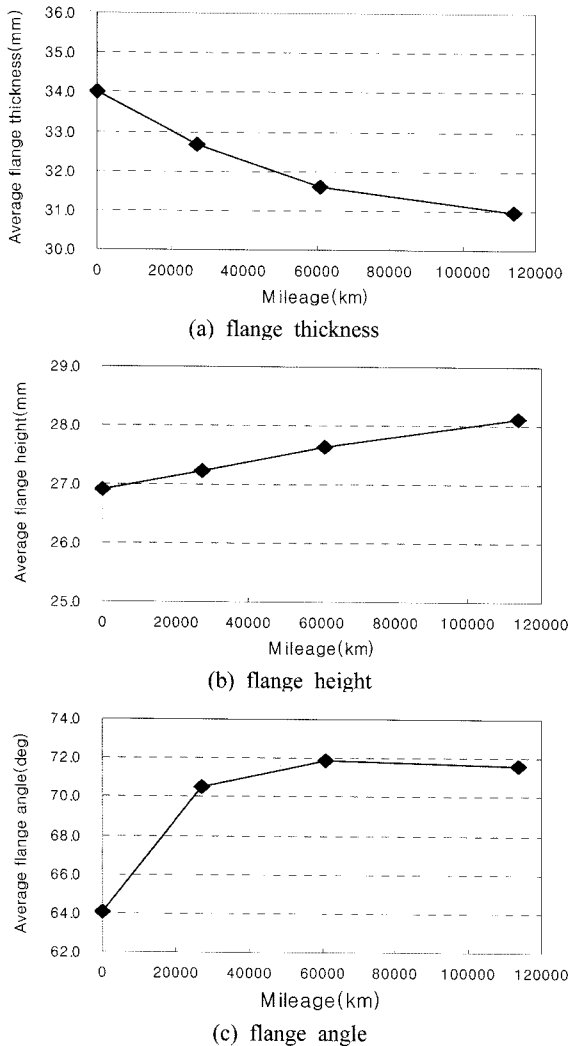


Fig. 11. Variation of the wheel dimension with mileage

3.2 등가담면구배 변화

차량의 사행동 안정성과 관련된 레일과의 기하학적 접촉 해석 인자인 등가담면구배(equivalent conicity)를 산출하였다. 등가담면구배는 윤축횡변위와 구름반경차간의 기울기의 반으로 정의된다. 등가담면구배는 차량의 사행동과 반비례하는 관계를 갖고 있으며 통상적으로 원추형담면일 경우 차륜담면의 마모가 진전되면 등가담면구배는 커지는 것이 일반적인 경향이다. 등가담면구배 산출 과정에서 차륜담면데이터는 실측한 각 각의 차륜담면형상 측정데이터를 적용하였으며 차륜내면간거리는 1356mm를 적용하였다. 레일은 60kg 레일 원형형상을 대상으로 하였으며 궤간은 1435mm, 레일 경좌는 1/40로 하였다[3-6].

Fig. 12는 각 차륜별 등가담면구배 분석 결과를 나타내며 Fig. 13은 누적주행거리에 따른 등가담면구배 평균치 변화를 나타낸다. 등가담면구배도 차륜 치수 변화와 마찬가지로 2차측정시의 변화가 크게 나타나고 있음을 보이고 있다.

누적주행거리 증가에 따라 0.07에서 0.14로 평균 0.07 증가하고 있음을 보이고 있다. 이는 초기 플랜지 직립마모로 인하여 등가담면구배 해석을 위한 차륜/레일 접촉점 해석(wheel/rail contact geometry)과정에서 윤축 횡변위에 대한 좌우 차륜의 구름반경차(rolling radius difference) 변화가 큼에 비롯된 결과라 할 수 있다.

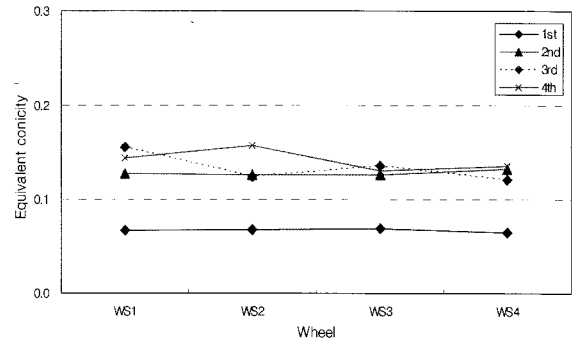


Fig. 12. Variation of the equivalent conicity

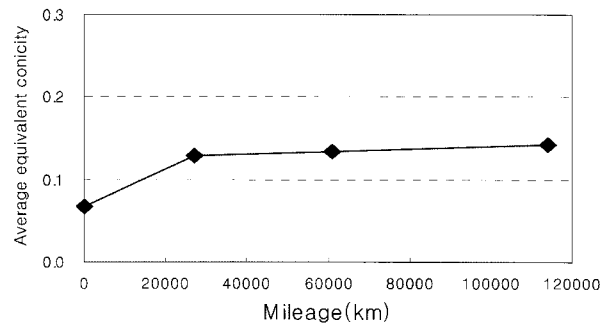


Fig. 13. Variation of equivalent conicity with mileage

4. 차량 진동특성 분석

차륜의 마모에 따른 차량 동특성 영향 분석을 위하여 차체 진동특성 분석을 수행하였다. 차량 진동시험 데이터 분석방법은 “도시철도성능시험기준 진동시험규격”을 준용하였다. 시험데이터를 100m 간격으로 나누어 그 때의 주행속도와 발생된 진동가속도의 peak to peak 최대값을 그 구간의 대표값으로 하고 전 구간에 대하여 속도별 산술평균을 취하는 분석방법으로 속도 대역에 따른 진동 수준을 파악하는 데 적합한 분석 기법이라 할 수 있다[7]. 비교분석 대상으로 한 시험데이터는 차량 진동시험 시 시험구간이 동일한 1차(test1), 2차(test2), 4차(test3) 시험데이터를 대상으로 하였다. 차량 각 부의 진동 수준 변화는 다음과 같다.

Fig. 14와 Fig. 15는 차체 진동에 대하여 분석한 p-p 최대값과 평균값을 나타낸다. 좌우, 상하방향 진동분석결과 모두 p-p 최대값은 누적주행거리가 증가함에 따라 속도대역별 진동이 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히 상하방향은

전 속도대역에서 뚜렷한 증가 경향을 보이고 있으며 좌우 방향 진동은 속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다.

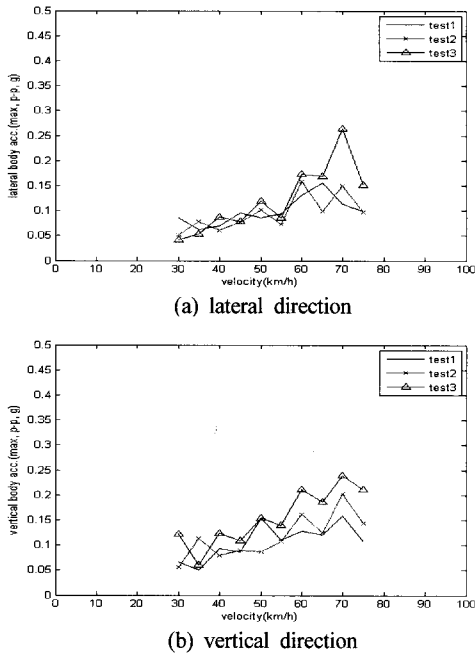


Fig. 14. Test results of the body acceleration(max.)

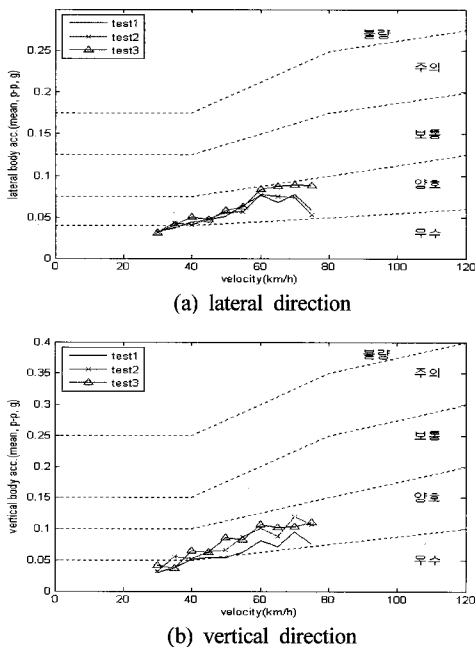


Fig. 15. Test results of the body acceleration(mean)

Fig. 15와 같이 p-p 평균값으로 하여 진동분석결과 수준을 “불량”에서 “우수”까지 5단계로 구분한 진동평가기준과 비교하면 좌우방향 차체 진동 평균은 모든 시험결과가 “양호”구간에 해당하는 수준을 보이고 있으나 초기에 비하여

증가하여 “양호”구간의 한계치에 근접하는 경향을 보이고 있다. 상하방향 차체 진동 평균도 좌우방향과 같은 경향을 보이고 있다.

상기 진동분석결과로부터 시험차의 누적주행거리가 증가함에 따라 차륜의 마모가 진전되고 그에 따른 차체의 진동 수준은 좌우, 상하방향 모두 증가하는 경향을 보이고 있음을 확인하였다.

현재까지는 진동 수준이 “양호”구간에 해당하고 있으나 향후 차륜의 마모량이 증가함에 따라 “보통”구간으로 진동 수준이 악화될 가능성이 있다고 예상된다. 이러한 누적주행거리와 차체 진동과의 관계는 철도 현장에서 승객서비스 향상을 위한 균일한 주행성능 확보관점에서 매우 관심이 큰 주제라 할 수 있다. 즉 차량의 균일한 주행성능 확보와 차륜 결함 예방을 위한 계획 경제사정관점에서 볼 때 일정 수준의 차체 진동 성능을 확보하기 위해서는 적절한 차륜삭정 주기 도출이 필요하고 이는 본 연구와 같이 차륜 마모와 차체 진동과의 관계 규명이 수반되어야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 전동차 차륜에 대한 마모 특성 분석과 차륜의 마모가 차량 진동특성에 미치는 영향을 분석하고자 도심 곡선구간에서 운용되는 전동차를 대상으로 실험적 연구를 수행하였다. 이에 대한 주요 결과는 다음과 같다.

- 차륜담면의 마모 형상 변화로 볼 때 차륜 원형삭정 후 주행 초기(30,000km 이하)에 차륜 치수 및 등가담면구배 변화가 심한 직립마모 특성을 보이고 있다고 할 수 있다. 이는 직선 고속주행특성에 비하여 곡선주행특성이 취약한 원추형 1/20구배담면의 전형적인 마모 특성을 보이고 있다고 사료된다.

- 시험차의 누적주행거리가 증가함에 따라 차륜의 마모가 진전되고 그에 따른 차체 진동 수준은 증가하는 경향을 보이고 있음을 확인하였다. 차체진동 평균은 좌우, 상하방향 모두 “양호” 수준으로 평가되고 있으나 누적주행거리 증가에 따라 증가하여 “양호” 구간의 한계치에 이르고 있다. 차체 진동 최대값은 더욱 뚜렷한 증가 특성을 보이고 있으며, 이는 불균일한 진동 발생 가능성이 커진다고 예측할 수 있다.

따라서 차륜 유지보수의 개념이 차량의 균일한 주행성능 확보와 차륜 결함 예방을 위한 적절한 차륜유지보수 주기 도출관점에서 보면, 누적주행거리에 따른 차륜 마모와 차체 진동과의 관계규명을 위한 본 논문에서 수행한 실험적 연구는 의미 있다고 할 수 있으며 이에 대한 실험은 향후에도 지속적으로 수행될 예정이다.

참고 문헌

1. 허현무, 이찬우, 권성태, 윤춘한(2003), “기존선 차륜담면형상의 마모패턴 분석”, 철도학회춘계학술대회논문집, pp.651~655.
 2. 허현무, 유원희(2005), “고속철도 차륜의 마모유형에 관한 연구”, 한국철도학회논문집 제8권 제5호, pp.477~482.
 3. 허현무 외(2004), “경제적 차륜담면관리기술 개발 3차년도 최종 보고서”, 철도청.
 4. 건설교통부(2005), 도시철도성능시험규격 별표24 진동시험.
 5. “Calculation of Equivalent Conicities for the S1002 Wheel Profile on UIC60 Rails”, ERRI Report DT54/E.
 6. “Interaction between vehicle and track”, ERRI Report C116/RP6/E.
 7. 허현무(2005), “전동차 차상진동 실시간 분석프로그램”, 프로그램등록200501129008577.
- 접수일(2008년 9월 5일), 수정일(2008년 10월 13일),
게재확정일(2009년 4월 10일)