

전동차 차륜 마모에 따른 차륜/레일 기하학적 접촉 특성 변화 분석

허현무[†], 박준혁, 유원희*, 박태원**

An Analysis on the Variation of the Wheel/Rail Contact Geometry with the Wheel Wear of EMU

Hyunmoo Hur, Joonhyuk Park, Wonhee You, Taewon Park

Key Words: Wheel Wear(차륜마모), Contact Geometry(기하학적 접촉특성)

Abstract

In a railway vehicle, contact between wheel and rail is a peculiar characteristic and variations of wheel and rail profile influence on the dynamic characteristics of railway vehicle. Thus the variations of the wheel and rail profile are very important in railway dynamics. Recently a research relating to active steering to improve the curving performance of vehicle is progressing actively at home and abroad. In this field, a pre-study for the wheel/rail contact geometry is needed and especially the variation of the wheel/rail contact geometry with wheel wear is the key design parameter to develop the controller of the active steering bogie.

In this paper, we have experimentally studied to analyze the variation of the wheel/rail contact geometry with wheel wear as a pre-study to develop the active steering bogie for electric multiple unit (EMU). For this, we have made an experiment with EMU operating in curving area. We have measured the wear profiles of the wheel of the test vehicle and analyzed the wheel/rail contact geometry with a mileage of the test vehicle. In experiment with test vehicle, we have got the useful data to design the steering controller of the wheelset.

1. 서 론

철도차량에서 차륜과 레일의 접촉은 고유한 특성으로 차량의 차륜과 레일의 형상 변화는 차량의 동적 특성에 영향을 미친다. 차륜과 레일간의 기하학적 접촉특성은 차륜과 레일간의 크립 특성에 영향을 미치고 이는 차량의 사행동 안정성이나 곡선구간에서의 주행성능에 영향을 미치게 한다. 따라서 차륜과 레일의 형상 변화는 철도차량 동역학에서는 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히

최근에는 철도차량에도 윤축의 조향기능을 능동적으로 제어하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는데 이와 관련된 분야에서는 차륜과 레일간의 기하학적 접촉 파라미터에 대한 선행 연구가 필요하며 또한 차륜의 마모로 인한 기하학적 접촉 파라미터의 변화에 대한 데이터 선행되어야 한다.

따라서 본 논문은 전동차용 능동조향대차 개발을 위한 선행 연구로서 전동차 차륜 마모로 인한 차륜/레일 기하학적 접촉 파라미터의 변화를 분석하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 곡선구간 빈도가 높은 도심구간에서 운용되는 전동차를 대상으로 차륜답면형상(wheel profile) 계측 실험이 수행되었으며 레일과의 기

† 한국철도기술연구원 주행추진연구실
E-mail : hmhur@krri.re.kr
TEL : (031)460-5245 FAX : (031)460-5299

* 한국철도기술연구원 주행추진연구실

** 아주대학교 기계공학과

하학적 접촉 해석을 수행하였다. 이에 대한 주요 결과를 본 논문에 소개하고자 한다.

2. 차륜담면 마모계측 시험

철도차량의 주행거리 누적에 따른 차륜담면에 마모가 진전되고 그에 따른 담면형상의 변화를 분석하기 위하여 도시철도용 전동차를 대상으로 실험적 연구를 수행하였다. 시험차는 도심 구간에서 운용되는 전동차를 대상으로 하였다.

시험조건은 Table 1과 같다. 시험차량의 부속품이 차륜 마모에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 시험차는 차량 상태가 양호한 차량을 선정하였으며 검수상태는 중수선 수준으로 검수 완료한 차량 1편성을 대상으로 하였다. 시험차 운용 노선은 급곡선 빈도가 높은 도심구간 노선에 운용토록 하였으며 운행조건은 정상 영업운행 조건으로 하였다. 이 구간에서의 레일 형상은 60kg 레일이 적용되어 있다.

차륜담면형상 계측시험 차량은 1량으로 하였으며 8개의 차륜은 전부 신품 차륜으로 교체하였고 차륜담면형상은 Fig. 1과 같이 전동차에 적용하고 있는 1/20구배 담면형상으로 원형 설정하였다. 시험기간은 시험차량으로 지정되어 영업운행에 투입된 시점으로부터 12개월 이상으로 하였으며 3개월 간격으로 차륜의 담면형상을 주기적으로 계측하였다. 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. 현재까지 총 4차에 걸친 차륜담면형상 계측이 이

루어 졌으며 4차 측정일 현재 시험차의 총 누적 주행거리는 약 113,911km 이다.

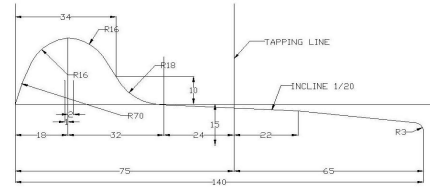


Fig. 1 Wheel profile for EMU



Fig. 2 Wheel profile gage

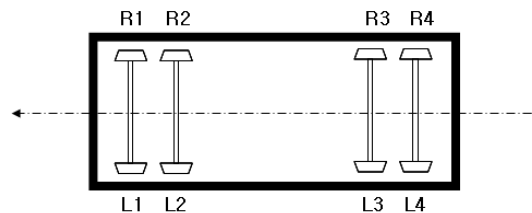


Fig. 3 Wheel numbering

Table 1 Test outline

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

3. 차륜담면 마모특성 분석

누적주행거리 증가에 따른 시험차 차륜담면의 마모특성을 분석하였다. 차륜담면형상 변화는 Fig. 4와 같이 초기 형상과 비교하여 플랜지두께 FT(mm), 플랜지높이 FH(mm), 플랜지경사각(deg)과 같은 차륜 치수 인자에 대하여 분석하였다.[1][2][3]

Fig. 5는 측정일에 따라 차륜담면형상의 마모 유형을 보여주는 사례이다. 초기 원형에 비하여 주행거리가 누적됨에 따라 플랜지의 마모가 진전

되고 있음을 보이고 있다.

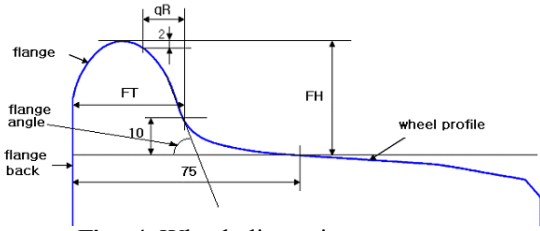


Fig. 4 Wheel dimension parameter

Fig. 6 ~ Fig. 8은 측정된 전 차륜에 대하여 플랜지두께, 플랜지높이, 플랜지경사각 변화를 분석한 선도이다. 각 각의 차륜 마다 다소 편차가 있으나 2차측정 데이터가 초기 원형상태에 비하여 플랜지두께, 플랜지경사각 변화가 심함을 보이고 있다.

이를 Fig. 9와 같이 시험차의 누적주행거리에 따른 차륜 치수 파라미터 평균치 변화를 보면 좀 더 명확히 알 수 있다. 즉, 총 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. 특히, 차륜담면의 마모 형상 변화로 볼 때 차륜 원형삭정 후 주행 초기인 2차 측정시(30,000km 이하)에 차륜 플랜지두께 및 플랜지경사각 변화가 심한 직립마모 특성을 보이고 있다고 할 수 있다. 2차 이후의 각 각의 치수 파라미터 변화는 완만한 경향을 보이고 있으며 특히 플랜지경사각은 약 72°에서 포화되는 경향을 보이고 있다.

따라서 이러한 담면형상의 마모 유형은 직선구간에서의 고속 주행특성에 비하여 곡선구간에서의 곡선 추종 특성이 취약한 원추형 1/20구배 담면형상의 전형적인 마모 특성을 보이고 있다고 사료된다.

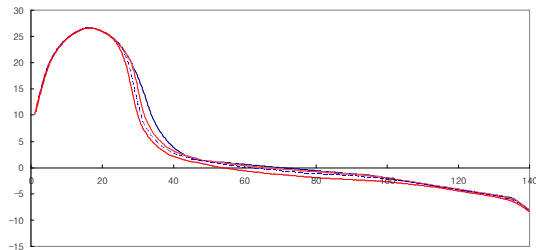


Fig. 5 Wheel wear sample

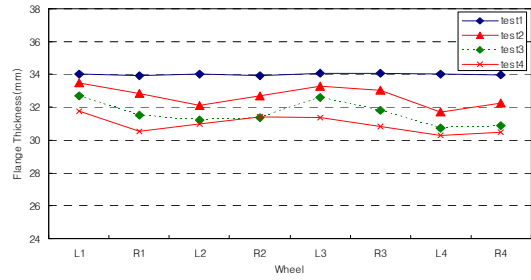


Fig. 6 Variation of the wheel flange thickness

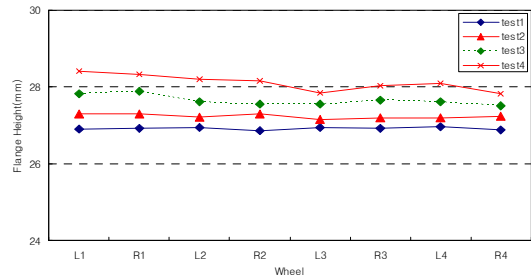


Fig. 7 Variation of the wheel flange height

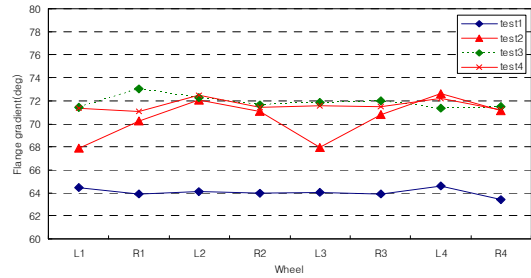
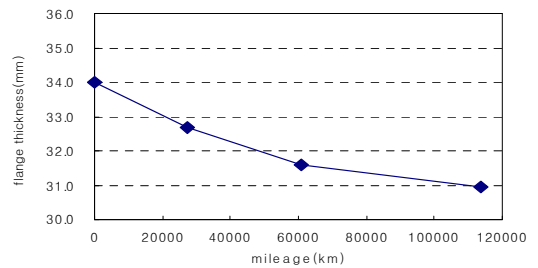
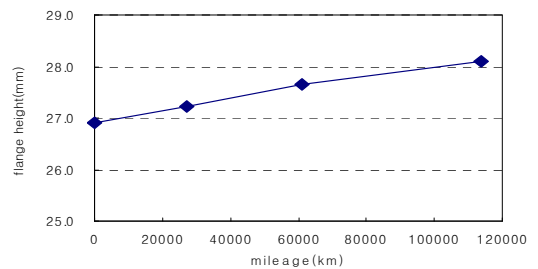


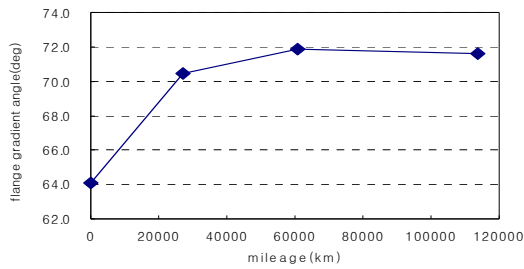
Fig. 8. Variation of the wheel flange gradient angle



(a) flange thickness



(b) flange height



(c) flange gradient angle

Fig. 9. Variation of the wheel dimension with mileage

4. 차륜/레일 기하학적 접촉특성 해석

차륜담면 마모형상은 차륜/레일간 기하학적 접촉(wheel/rail contact geometry) 해석과정에서 좌우 차륜에서의 접촉점 위치를 변화하게 한다. 이러한 접촉점 변화는 좌우 차륜의 구름반경(rolling radius), 구름반경차(rolling radius difference), 접촉각(contact angle), 접촉각차(contact angle difference), 접촉면적, 접촉타원상 장반경과 단반경간의 비 등과 같은 기하학적 접촉 파라미터의 변화를 초래한다. 이러한 접촉 파라미터는 차량 동특성 해석시 차륜/레일간의 크립력 계산과정에서 입력 파라미터로 활용된다. 본 연구에서 적용한 접촉 파라미터 산출방법은 FRA의 방법을 사용하였으며 주요 파라미터에 의한 계산식은 다음과 같다.[3][4][5]

구름반경(rolling radius, r)

$$r_R, r_L$$

구름반경차(rolling radius difference, Δr)

$$\Delta r = r_R - r_L$$

접촉각(contact angle, δ)

$$\delta_R = \arctan\left[\frac{d}{dy_{w_R}}(r_R)\right]$$

$$\delta_L = \arctan\left[\frac{d}{dy_{w_R}}(r_L)\right]$$

접촉각차(contact angle difference, $\Delta\delta$)

$$\Delta\delta = \delta_L - \delta_R$$

등가담면구배(equivalent conicity, λ_e)

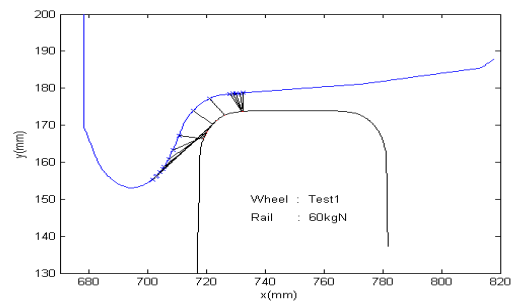
$$\lambda_e = \frac{(r_R - r_L)}{2y}$$

여기서, y : 윤축의 좌우 횡변위(mm)

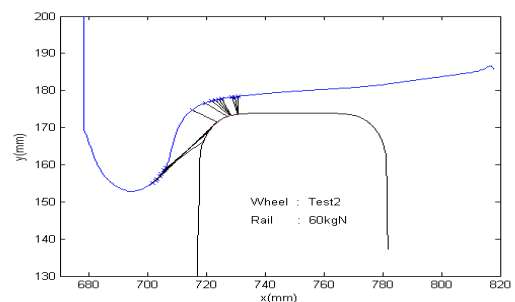
$r_L - r_R$: 윤축의 횡변위에 따른 좌우 구름반경차(mm)

차륜과 레일간의 기하학적 접촉점 해석을 위하여 다음과 같은 조건을 적용하였다. 차륜담면형상은 실측한 차륜담면형상 데이터를 측정차수 별로 평균한 평균 담면형상을 적용하였으며 레일은 원형의 60kg 레일 형상으로 모델링하였다. 침목과 레일간의 부설 기울기인 레일경좌는 1/40구배로 하였으며 궤간(gage)은 1,435mm인 표준궤간으로 가정하였다. 좌우 차륜간의 거리인 차륜내면 거리는 1,356mm로 하였다.

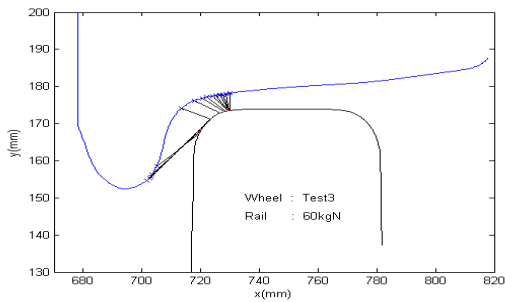
Fig. 10은 차륜담면형상의 마모에 따른 레일과의 기하학적 접촉점 해석을 수행하여 구한 접촉점 분포를 나타낸다. 차륜담면형상이 원형상태인 Test1의 경우, 접촉점은 레일의 두부와 차륜담면의 트래드부, 그리고 레일의 게이지코너부와 차륜플랜지부에 분포하고 있다. 이에 반하여 차륜담면의 마모가 진전되는 Test2, Test3, Test4인 경우에는 접촉점분포가 레일의 게이지 코너부, 차륜의 플랜지 시작점부근으로 이동하는 경향을 보이고 있다.



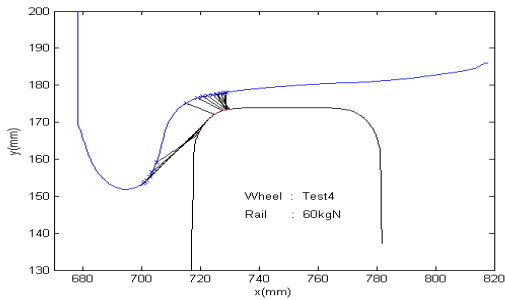
(a) Test1



(b) Test2



(c) Test3



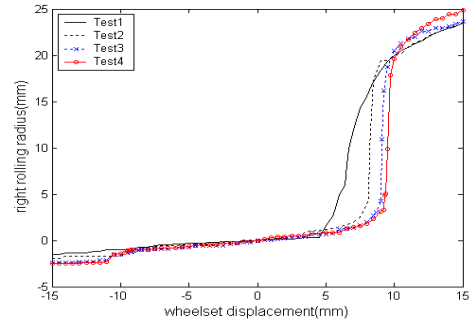
(d) Test4

Fig. 10 Wheel/rail contact patch

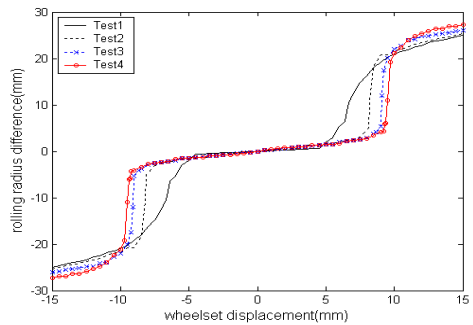
이러한 접촉점 위치 변화는 Fig. 11과 같이 접촉 파라미터를 변화하게 한다. Fig. 11(a)에서와 같이 플랜지 마모로 인하여 플랜지두께가 얇아짐에 따라 원형 차륜담면의 경우에 비하여 마모 차륜담면은 구름반경의 변곡점 위치가 변함을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 좌우 차륜의 구름반경차를 나타내는 선도이다. 마모 차륜담면의 경우, 원형 차륜담면의 경우에 비하여 선도의 기울기가 증가하는 경향을 보이고 있으며 이는 결국 이 선도의 기울기의 반으로 정의되는 등가담면구배를 증가시키는 역할을 한다. Fig. 11(c)는 접촉점에서의 차륜의 접촉각을 나타내는 선도로 차륜담면 마모형태에 따라 접촉각이 상이해짐을 알 수 있다. Fig. 11(e)는 접촉점에서의 타원의 면적을 나타내며 Fig. 11(f)는 접촉 타원의 장단반경간의 비를 나타낸다. 특히 접촉면적의 비는 크립력 계산시 크립계수를 결정하는 인자로 작용하는 중요한 인자라 할 수 있는데 차륜의 마모로 인한 담면형상 변화로 인하여 접촉 타원의 형상을 변경하게 한다고 할 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 11(b)의 구름반경차선도로 부터 구한 등가담면구배를 누적주행거리에 대하여 나타낸 선도이다. 등가담면구배도 차륜 치수 변화와 마찬가지로 2차측정시의 변화가 크게 나타나고 있음을 보이고 있다. 누적주행거리 증가에

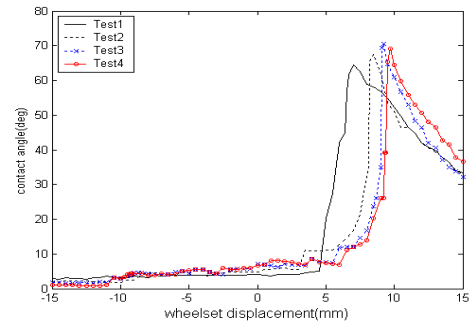
따라 0.07에서 0.14로 평균 0.07 증가하고 있음을 보이고 있다. 이 후는 변화가 미미함을 보이고 있다. 이는 초기 플랜지부의 직립마모로 인하여 차륜/레일 접촉파라미터 해석시 윤축 횡변위에 대한 좌우 차륜의 구름반경차 변화가 큼에 비롯된 결과라 할 수 있다.



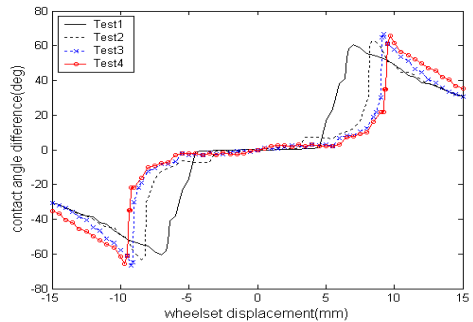
(a) right rolling radius



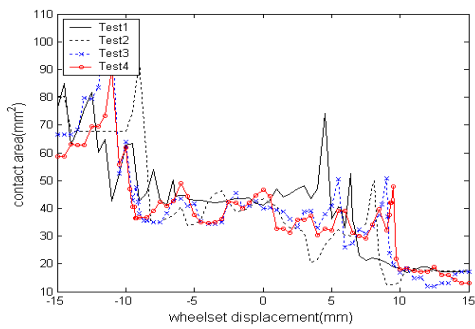
(b) rolling radius difference



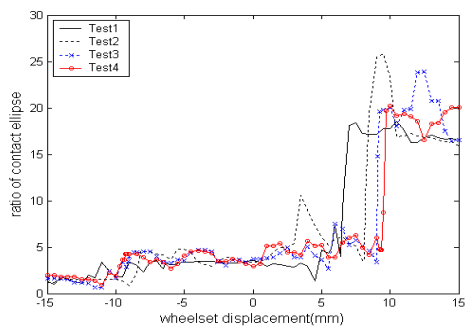
(c) contact angle



(d) contact angle difference



(e) contact area



(f) ratio of contact ellipse

Fig. 11 Contact geometry parameters

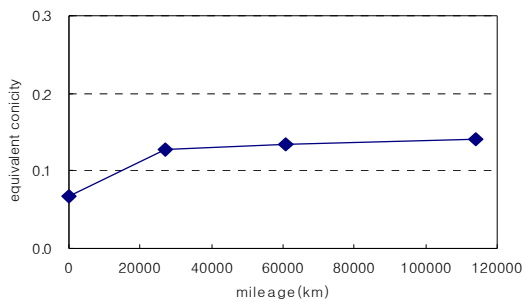


Fig. 12 Variation of equivalent conicity with milage

4. 결론

본 논문은 전동차용 능동조향대차 개발을 위한 선행 연구로서 전동차 차륜 마모로 인한 차륜/레일 기하학적 접촉 파라미터의 변화를 분석하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 곡선구간 빈도가 높은 도심구간에서 운용되는 전동차를 대상으로 차륜답면형상 계측 실험을 수행하였다. 레일간의 기하학적 접촉 해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

차륜의 마모로 인한 차륜답면형상의 변화는 차

륜 원형삭정 후 누적주행거리 30,000km 이하의 주행 초기에 차륜답면형상 치수 변화가 심한 직립마모 특성을 보이고 있다고 할 수 있다. 이는 곡선구간에서의 적응성이 취약한 원추형 1/20구배 전동차용 차륜답면형상의 전형적인 마모 특성을 보이고 있다고 사료된다.

차륜/레일간 기하학적 접촉 파라미터의 변화는 차륜의 마모가 진전됨에 따라 기울기 변화가 커지는 특성을 보이고 있다. 등가답면구배는 초기 0.07에 비하여 113,911km 주행시 약 2배로 증가함을 보이고 있다. 따라서 이러한 접촉 파라미터의 변화는 향후 조향대차 개발시 윤축의 거동을 제어함에 있어서 비선형성 증가시키고 이로 인한 제어성능을 저하시킬 가능성이 있을것으로 예측된다.

본 실험결과는 현재 진행중인 조향대차 개발과정에서 윤축의 동역학적 거동 특성을 해석할 때 기초 데이터로 활용될 계획이다. 이후에도 차륜의 중수선 유지보수기간인 3년 주기까지도 본 실험은 계획될 예정이다. 아울러 차륜의 마모와 그로 인한 차량 동특성 변화에 대한 연구도 지속적으로 수반될 예정이다.

참고문헌

- (1) Hur, H. M., Lee, C. W., Kwon, S. T. and Yun, C. H., 2003, "Analysis on the Wear Pattern of Wheel Profiles for Conventional Line", *Proceedings of Korean Society for Railway*, pp. 651~655
- (2) Hur, H. M., You, W. H., 2005, "A Study of the Wear Characteristics of Wheel Profile for High Speed Rolling-Stock", *Journal of The Korean Society of Railway*, Vol.8 No.5, pp.477 ~ 482
- (3) Hur, H. M., 2004, *Development of Economical Wheel Maintenance Technology*, KNR
- (4) "Calcalaton of Equivalent Conicities for the S1002 Wheel Profile on UIC60 Rails", *ERRI Report, DT54/E*
- (5) "Interaction between vehicle and track", *ERRI Report C116/RP6/E*