

기존철도 차륜/레일형상의 적합성 분석

허현무[†] · 서정원^{*} · 정흥채^{*} · 구동회^{**}

Compatibility Analysis of Wheel/Rail Profile on Conventional Railway

Hyun-Moo Hur, Jung-Won Seo, Heung-Chai Chung, Dong-Hoe Goo

Key Words: Railway Wheel(철도차륜), Rail(레일), Wheel Profile(차륜답면형상), Lateral force(횡압), Equivalent Conicity(등가답면구배)

Abstract

Railway wheel/rail contact conditions have an influence on dynamic behavior of rolling stock. If there are problems of incompatibility between wheel and rail, damages like wheel wear, wheel spalling, rail wear, etc are occurred. Especially wheel and rail profiles are important factor of vehicle curving performance, so compatibility study between wheel and rail has to be carried out preferentially. In this study, we have analyzed the compatibility between wheel and rail of KNR conventional line to improve the maintenance efficiency of wheel and rail. Thus we showed the results relating to wheel/rail geometric contact, vehicle running performances as the change of wheel/rail combination.

1. 서 론

철도차륜은 주행중 레일과 접촉하면서 차량이 안전하게 궤도면을 따라 주행토록 하는 중요 구성품 중의 하나이다. 차륜과 레일의 접촉현상은 차량의 동적거동 및 주행속도에 영향을 미치며, 차량시스템, 차량과 궤도간의 인터페이스 관련 부적합한 요소가 존재하면 차륜, 레일의 손상문제가 발생하게 된다. 특히 차륜답면형상, 레일형상은 차량의 곡선주행성능에 큰 영향을 미침으로 신차 제작시나 운용선로 변경시엔 차량/궤도와의 적합성 검토측면에서 우선적으로 검토되어야 할 항목이며 유지보수측면에서도 중요시 되고 있다.

그러나, 이러한 차륜답면형상의 적용배경을 살펴보면 대부분 해외 차량의 국내 도입시에 차량의 고속주행성능에 초점을 맞추어 도입된 차륜답면형상으로서 곡선비중이 많은 국내 선형특성과의 적합성 검토가 미흡한 면이 있다. 즉, 일부 차량의 차륜답면은 국내 궤도조건과의 적응성 미흡으로 과도한 차륜마모를 초래하고 있으며, 이는 차량의 동적성능 측면에서 진동 및 승차감 악화와 같은 문제를 유발하고, 차량의 유지보수측면에선 차륜수명 단축, 차륜보수비용 증가등의 문제를 유발하고 있다. 또한 궤도측면에선 레일 게이시코너부의 측마모를 가속화 하여 궤도 유지보수비 증가의 요인이 되기도 한다.

따라서 본 연구에서는 차륜 및 레일의 유지보수성 향상과 안정된 동적성능 확보를 위하여 차륜 및 레일간 조합에 대한 적합성 검토연구를 수행하였다. 이를 위하여 국내 기존선로에서 운용 중인 3종의 차륜답면형상과 2종의 레일형상을 중심으로 각 차륜 및 레일형상간의 조합에 의한 차륜/레일 기하학적 접촉특성, 차량의 동적성능에

[†] 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

E-mail : hmhur@krii.re.kr

TEL : (031)460-5245 FAX : (031)460-5279

^{*} 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

^{**} 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단

대한 분석결과를 소개하고자 한다.

2. 차륜, 레일형상

2.1 차륜담면형상

국내 150km/h급 기존선 운용 차량에 적용되고 있는 차륜담면형상은 담면형상의 특성에 따라 원추형(conical) 및 원호형(arc) 담면형상으로 구분한다. 원추형 담면형상은 담면구배가 1/20구배 및 1/40구배로서 이러한 원추경사담면 차량은 일반적으로 직선구간에서 차량의 고속주행시 사행동에 대한 주행안정성은 우수하지만 곡선구간 주행시 차륜플랜지와 레일간 2점접촉을 유발하여 차륜형압의 증가를 초래하여 차량의 선회성능을 저하시키는 문제점을 유발하기도 한다.

국내 기존선에서 적용중인 철도차량의 차륜담면은 Fig. 1~Fig. 3과 같이 원추형 1/40담면, 1/20담면, 원호형 1/20heumann담면 3종류가 있다. 1/40담면은 객차, 새마을동차, 디젤기관차, 전기관차에, 1/20담면은 화차, 기관차에 적용되고 있으며, 1/20heumann담면은 객차, 전동차에 적용되고 있다.

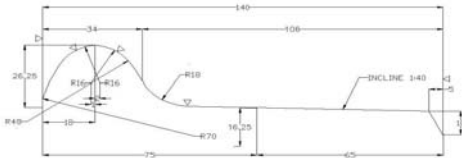


Fig. 1 KNR 1/40 profile

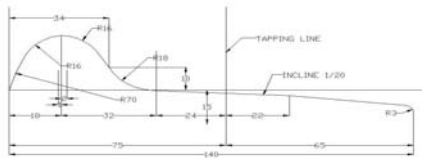


Fig. 2 KNR 1/20 profile

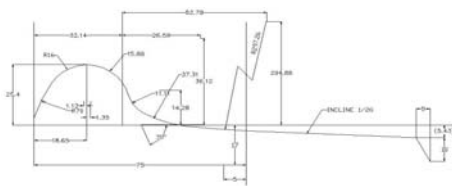


Fig. 3 KNR 1/20heumann profile

Fig. 4는 차륜담면형상의 주요 치수인 플랜지 두께(FT), 플랜지높이(FH), 플랜지각(Flange Angle)을 나타내는 그림이다. Table 1은 각 차륜에 대한 기하학적 치수특성을 분석한 표이다. KNR 1/40담면과 KNR 1/20담면은 플랜지부의 형상은 동일하나 담면부의 구배가 1/40, 1/20로 상이하다. KNR 1/20h 담면은 원호형담면으로 원추형 담면인 KNR 1/40, KNR 1/20담면보다 플랜지두께가 넓으며, 플랜지목 부근이 KNR 1/40, KNR 1/20담면이 R18의 단일원으로 구성된 반면 KNR 1/20h 담면은 R11, R27, R297으로 3가지 형태의 원으로 구성되어 있다.

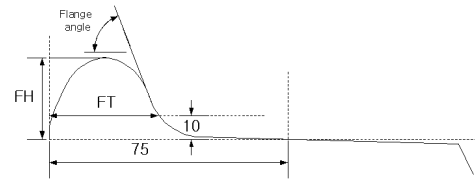


Fig. 4 Parameters of wheel profile

Table 2 Wheel dimension

담면형상	FT(mm)	FT(mm)	FT(mm)
KNR 1/40	34.6	26.2	68.9
KNR 1/20h	35.4	27.5	71.1
KNR 1/20	34.9	26.8	68.9

2.2 레일형상

기존선로에 운용되고 있는 레일은 Fig. 4의 50kgN 레일과 Fig. 5의 60kg 레일이 적용되고 있다. 현재 기존선로의 상당 구간은 50kgN 레일이 적용되고 있으나 신설 및 교체되는 구간은 60kg 레일로 대체되고 있는 추세이다.

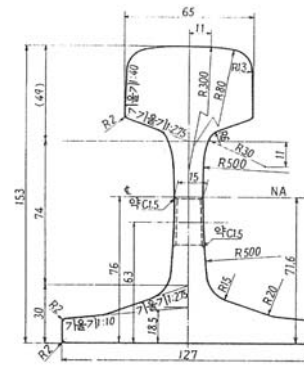


Fig. 5 KNR 50kgN Rail

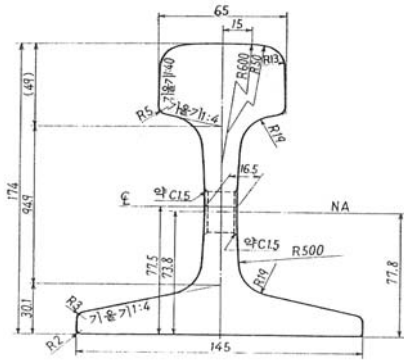


Fig. 6 KNR 60kg Rail

3. 차륜/레일접촉 기하학적 특성

3종의 차륜답면형상과 2종의 레일형상에 대하여 각 각의 차륜과 레일의 접촉시를 가정한 Table 1과 같은 6가지 경우에 대하여 기하학적 접촉특성을 분석하였다. 차륜과 레일간의 접촉점 위치를 분석하고자 차륜의 횡변위에 따른 레일과의 접촉점 위치에 대한 해석을 수행하였으며, 그리고 고속주행성능과 관련된 등가답면구배 (equivalent conicity, λ_e)를 구하였다.

$$\lambda_e = \frac{1}{2} \int \frac{N(y)(r_R - r_L)}{y} dy \quad \dots(1)$$

여기서, $N(y)$: Weighting Function

$r_R - r_L$: Rolling Radius Difference(mm)

y : Lateral Shift(mm)

등가답면구배는 식(1)과 같이 표현되며 플랜지 접촉이 발생하지 않는 범위에서 윤축의 횡방향 변위에 대한 접촉점에서의 좌우반경변화율로서 정의된다. 차륜과 레일의 접촉빈도에 따라 Weighting function이 부가되며 Weighting function은 차륜/레일간의 접촉점 빈도로 통상적으로 정규분포를 따른다는 가정하에 플랜지접촉이 발생하지 않는 영역에서 일차함수로 선형화하여 구한다. 정규분포함수 $N(y)$ 는 평균 0, 표준편차 2.5로하여 2σ 의 범위까지 산정하였다.

Fig. 7은 차륜/레일간 접촉점을 해석한 예이며, Fig. 8은 등가답면구배를 산정한 예이다. 등가답면구배 해석결과, Table 1에서와 같이 KNR 1/40, KNR1/20답면에 비하여 KNR 1/20h답면의 등가답면구배가 크게 산출됨을 알 수 있다. 이는 Fig. 9와 Fig. 11에서와 같이 원추형 KNR 1/40

답면의 횡변위 5mm까지의 접촉점이 50kgN레일, 60kg 레일두정부에 분포되는 반면 원호형답면인 KNR 1/20h답면의 접촉점은 레일의 게이시코너부에 집중되고 있다. 이로인하여 차륜 횡변위에 따른 Rolling Radius Difference 변화가 크게 됨으로서 (1)식에 의해 등가답면구배가 크게 산출됨을 알 수 있다.

Fig. 13, Fig. 14는 각 경우에 대한 Rolling Radius Difference, 등가답면구배를 나타낸 선도이다.

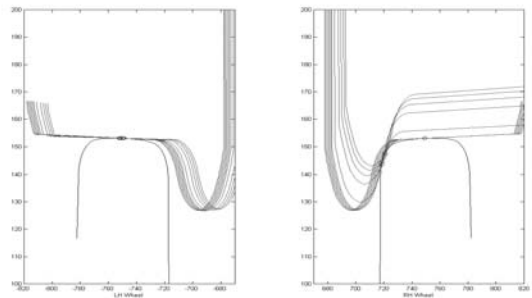


Fig. 7 Contact points of KNR 1/40 wheel and 50kgN rail

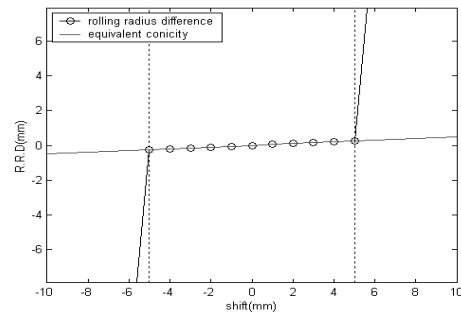


Fig. 8 Rolling radius difference

Table 1 Equivalent conicity of wheel/rail combination

Case	Rail	Wheel	Equivalent conicity
1	50kgN	KNR 1/40	0.025
2		KNR 1/20h	0.64
3		KNR 1/20	0.16
4	60kg	KNR 1/40	0.12
5		KNR 1/20h	0.54
6		KNR 1/20	0.20

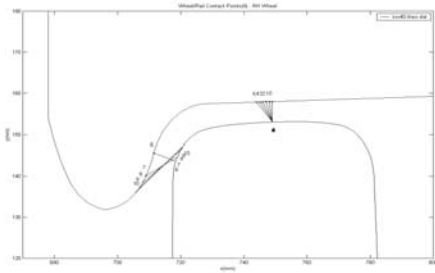


Fig. 9 Contact points of KNR 1/40 wheel and 50kgN rail

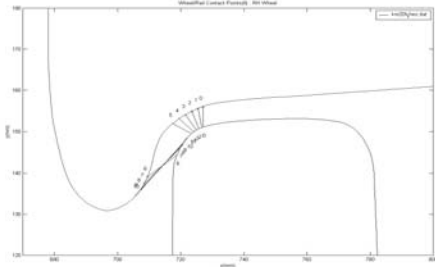


Fig. 10 Contact points of KNR 1/20h wheel and 50kgN rail

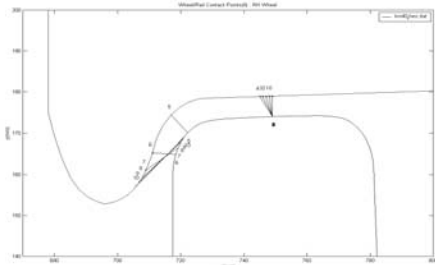


Fig. 11 Contact points of KNR 1/40 wheel and 60kg rail

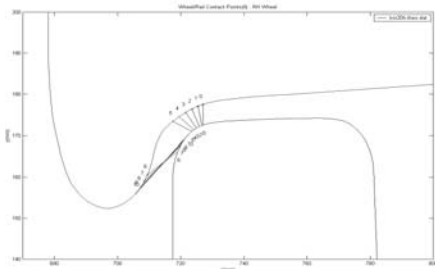


Fig. 12 Contact points of KNR 1/20h wheel and 60kg rail

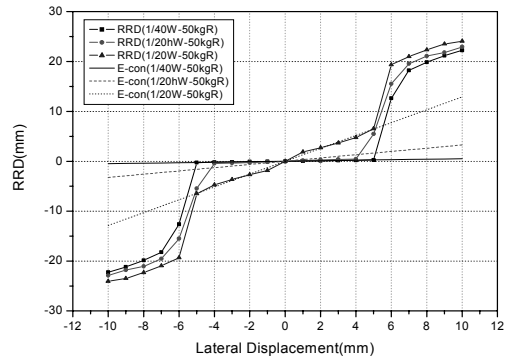


Fig. 13 Contact parameters (wheels-50kgN rail combination)

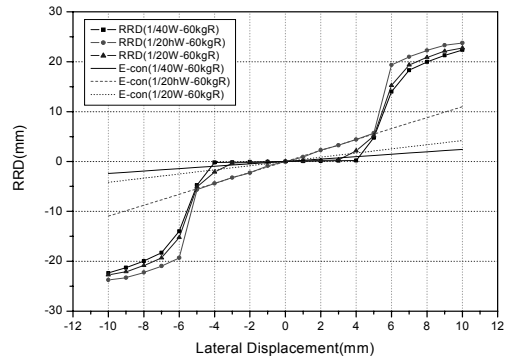


Fig. 14 Contact parameters (wheels-60kg rail combination)

4. 주행동특성 분석

차륜과 레일의 조합에 따른 접촉조건이 차량의 주행동특성에 미치는 영향을 분석하고자 차량동특성해석을 수행하였다. 해석차종은 기존철도 대표차종인 무궁화객차를 대상으로 하였으며 철도 차량동특성해석 전용프로그램인 영국 AEA Technology사의 VAMPIRE(Vehicle dynAmic Modelling Package In a Railway Environment, ver4.1)를 사용하였다.

4.1 곡선주행성능 해석

곡선주행성능해석은 차량의 곡선주행시를 가정하여 차륜에 미치는 횡하중, 마모관련 인자, 탈선 안전도를 분석하기 위하여 수행하였다. 해석구간은 급곡선이라 할 수 있는 R400곡선을 케도틀립이 없는 이상적인 곡선으로 가정하였고, 주행속

도는 곡선통과 허용속도인 90km/h로 하였다.

Table 2는 주행동특성 관련 해석결과를 나타낸다. 6가지의 차륜/레일 조합에 대하여 case2인 KNR 1/20h담면/50kgN 레일의 경우에서 곡선주행 성능관련 인자인 횡압(LF), 윤중감소율(ΔQ), 탈선계수(P/Q), 마모지수(Wear No.)가 다른 5가지의 경우의 값보다 저감되고 있음을 알 수 있다. 또한 원호형담면인 case2, case4가 원추형담면인 다른 4가지 경우에 비하여 모든 인자에서 저감되고 있음을 알 수 있다. 이는 레일의 형상변화보다 차륜의 형상변화에 의한 요인이 큼에 기인한 것으로 곡선주행시 접촉부인 차륜플랜지목부의 형상변화에 따른 결과라고 할 수 있다. Fig. 15~18은 해석 파라미터에 대한 결과를 나타낸다.

Table 2 Results of dynamic analysis

Case	Curving				Ride		Critical Speed (m/s)
	LF (kN)	ΔQ (%)	P/Q	Wear No.	Lat. (dB)	Vert. (dB)	
1	21.9	24.0	0.37	135	103.0	102.1	80
2	16.4	23.8	0.27	108	101.2	102.1	50
3	21.3	23.5	0.36	108	102.7	102.1	70
4	22.1	24.6	0.37	109	102.9	102.1	80
5	17.3	23.2	0.29	108	101.1	102.1	50
6	21.6	23.3	0.36	108	102.8	102.1	70

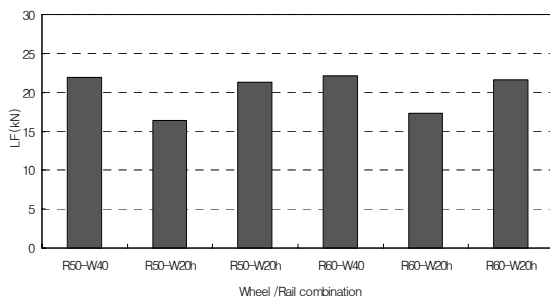


Fig. 15 Lateral Force

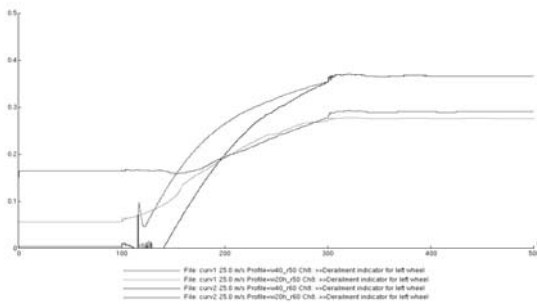


Fig. 16 P/Q of curving analysis

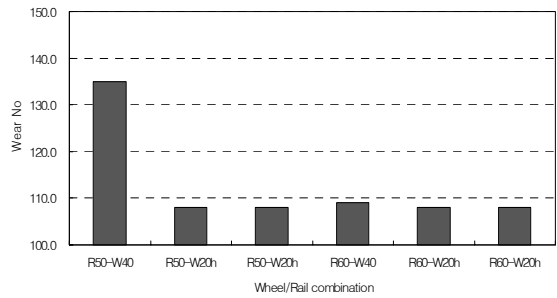


Fig. 17 Wear Number of curving analysis

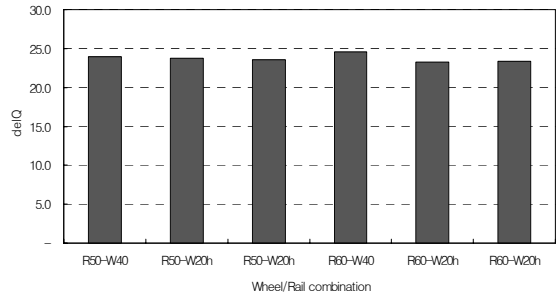


Fig. 18 Wheel unloading of curving analysis

4.2 임계속도 해석

6가지의 차륜/레일 접촉조건에 대한 차량의 주행안정성을 분석하기 위하여 차량의 한계성능인 임계속도 해석을 수행하였다. 본 해석은 일정속도로 주행중인 차량에 횡방향 외란을 부여한 후, 차량모델 각 요소의 횡방향 거동의 시간감쇠를 파악하여 계의 동적안정성을 분석하는 기법이다.

해석결과 case2, case4의 원호형담면 적용시가 원추형담면을 적용한 다른 조건보다는 임계속도가 저하하고 있음을 알 수 있다. 이는 원추형 및 원호형 차륜담면형상의 담면형상 설계개념이 반영된 결과로 일반적으로 원추형담면이 고속주행에 우수하다는 이론적 결과와 부합하고 있음을 알 수 있다. 그러나 모든 경우가 50m/s(180km/h) 이상의 결과를 나타내어 현 국내 기존철도의 운영최고속도인 140km/h를 상회하고 있으므로 각각의 조건에 대한 차량주행시의 안정성엔 이상이 없을 것으로 판단된다. Fig. 19는 case2에 대한 임계속도 해석결과를 나타낸다.

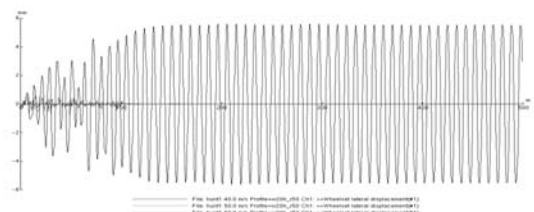


Fig. 19 Example of hunting analysis

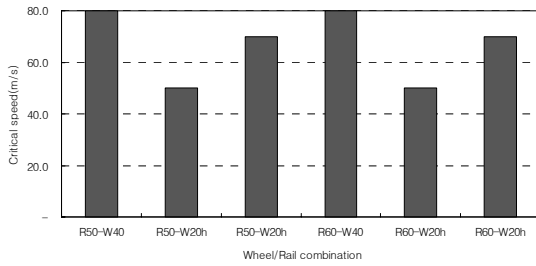


Fig. 20 Critical speed of hunting analysis

4.3 승차감 해석

차륜/레일 접촉조건에 의한 승차감의 영향 분석을 위하여 승차감 해석을 수행하였다. 본 해석은 국내 기존선로 1.8km를 샘플링한 해석구간에 대하여 120km/h 주행시를 가정하여 차량 객실내 후부위치에서의 좌우 및 상하방향에 대한 승차감 레벨을 산출하는 기법이다. 승차감해석을 위한 진동필터는 UIC513에 의한 좌우 및 상하방향 weighting filter를 적용하였다.

해석결과 상하방향은 모두 102.1dB로 동일한 승차감레벨을 나타내고 있다. 좌우방향은 case2, case4의 원호형담면 적용시가 원추형담면을 적용한 4가지 경우보다 다소 저감되고 있음을 알 수 있다. 또한, 레일형상 변화시 조건인 case1과 case4, case2와 case5, case3와 case6를 비교하여 보면 매우 미미한 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서, 차륜/레일 접촉조건 변화에 따른 승차감레벨 변화는 그 크기가 매우 미미하여 전반적으로 모든 경우에서 거의 등가의 승차감 수준을 보이고 있다고 사료된다.

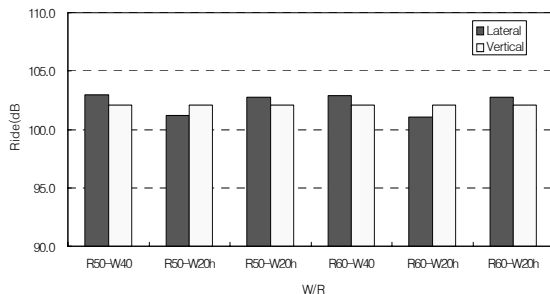


Fig. 21 Ride level

4. 결론

본 연구에서는 국내 기존선로에서 운용중인 3

종의 차륜담면형상과 2종의 레일형상에 대하여 차륜 및 레일형상간의 조합에 의한 차륜/레일 기하학적 접촉특성, 차량의 동적성능에 대한 적합성 분석연구를 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

차륜/레일의 접촉조건에 의한 주행특성의 영향은 레일형상변화보다 차륜담면형상의 변화시 크게 나타나고 있다.

원호형담면인 KNR 1/20h담면 적용시의 접촉조건이 원추형담면인 KNR 1/40, KNR1/20담면 적용조건에 비하여 곡선주행특성에 양호하여 기존선 속도 운용범위내에서는 유지보수성 측면에서 효율적일 것으로 사료된다.

레일의 형상변화는 2종의 레일두부형상 차이가 크지 않음으로 레일형상변화에 의한 차량동특성 변화는 차륜형상변화에 의한 영향보다 미미함을 알 수 있다.

그러나 본 해석은 차륜 및 레일도면에 의거한 이론해석에 한정된 결과로 이에 대한 검증을 위하여 시험선로에서의 실차적용시험등이 향후 연구되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 철도청 철도기술연구개발사업으로 지원된 경제적 차륜담면관리기술 개발과제의 연구결과 일부입니다.

참고문헌

- (1) Vijay K. G., Rao V. D., 1984, *Dynamics of Railway Vehicle Systems*, Academic Press, pp. 58~134.
- (2) Hur, H. M., Lee, C. W., 2000, "Wheel Flange Wear Reduction of Rolling Stock", *Proceedings of Korean Society for Railway*, pp. 143~150.
- (3) 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.