

국내 철도 차륜/레일형상 조합에 따른 차량 동특성 분석 연구

A Study on Dynamic Characteristics of the Rolling-stock for the Combination of Domestic Wheel/Rail Profiles

허현무* · 서정원* · 권석진* · 김남포*

Hyun-Moo Hur · Jung-Won Seo · Seok-Jin Kwon · Nam-Po Kim

Abstract

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

Keywords : Wheel Profile(차륜답면형상), Rail(레일), Wheel/Rail combination(차륜/레일 조합), Dynamic Characteristic(동특성)

1. 서론

차륜과 레일간의 접촉특성은 기하학적 형상에 의한 영향이 크며, 이는 차량의 동적기동 및 유지보수에 영향을 미친다. 차륜/궤도간의 인터페이스 측면에서의 부적합 문제, 즉 차륜과 레일간의 형상 및 치수와 관련된 부적합 요소가 존재하면 차륜, 레일의 손상 및 동적 성능에 영향을 미치게 된다. 특히, 차륜의 답면형상과 레일의 두부형상은 차량의 고속 및 곡선주행성능에 큰 영향을 미침으로 신차 제작이나 운용선로 변경시엔 차륜/궤도와의 적합성 검토 측면에서 우선적으로 검토되어야 한다.

그러나, 국내 차륜답면형상의 적용 배경을 살펴보면 대부분 해외 차량의 국내 도입시에 차량의 고속주행성능에 초점을 맞추어 도입된 차륜답면형상으로서 곡선비중이 많은 국내 선형특성과의 적합성 검토가 미흡한 면이 있음이 사실이다. 즉, 일부 차량의 차륜답면은 국내 궤도조건과의 적응성 미흡으로 차륜의 마모, 손상, 동적성능 저하와 같은

문제를 유발하며 이로 인하여 차량 유지보수비용의 증가를 초래하고 있다.

그러므로, 차륜은 레일 위를 전주하면서 구동하는 하나의 철도부품인 동시에 차륜/궤도 인터페이스 관점에서는 차량과 궤도의 직접적인 상호작용이 일어나는 경계이기도 하다. 이러한 의미에서 차륜/레일의 인터페이스와 관련된 적합성 검토 연구의 필요성이 제기된다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 운용중인 차륜과 레일형상에 대하여 각 차륜과 레일형상간의 조합에 따른 차량 동특성 분석 연구를 수행하였다. 이를 위하여 차륜답면형상과 레일두부형상간의 적응성 측면에서 기하학적 접촉해석을 수행하였으며 각 차륜/레일간 접촉특성이 차량의 동적성능에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

2. 차륜/레일 형상

국내에서 운용되고 있는 차륜답면형상은 Fig. 1과 같이 기존철도 차량에 적용되고 있는 원추형 1/40구배 답면형상(KNR40답면), 1/20구배 답면형상(KNR20답면), 원호형 1/20구배 heumann답면형상(KNR20h답면)과 고속철도차량에 적용되고 있는 1/40구배의 GV40답면, 1/20구배의 XP55답면

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

E-mail : hmhur@krri.re.kr

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

* 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

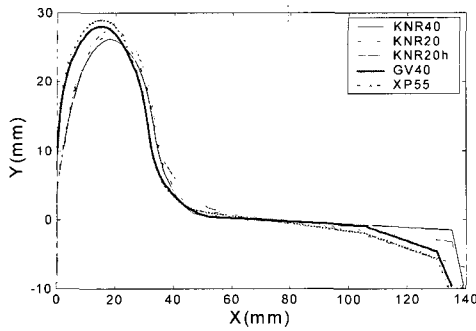


Fig. 1. The wheel profiles

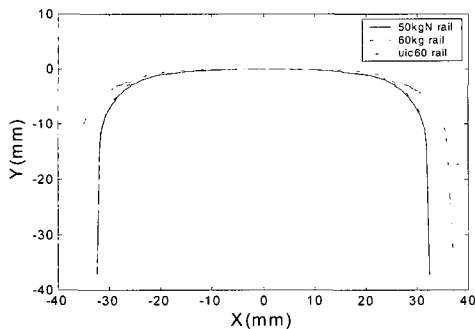


Fig. 2. The rail profiles

총 5종이 적용되고 있다. KNR40답면은 객차, 새마을동차, 디젤기관차, 전기기관차에, KNR20답면은 화차, 전동차, 기관차에 적용되고 있으며, KNR20h답면은 객차, 전동차에 적용되고 있다.

레일형상은 기존선 구간에는 Fig. 2와 같이 레일경좌 1/40인 KNR 50kgN레일, KNR 60kg레일이 적용되고 있으며, 고속선 구간에는 레일경좌 1/20인 UIC 60kg 레일이 적용되고 있다.

3. 기하학적 접촉특성 해석

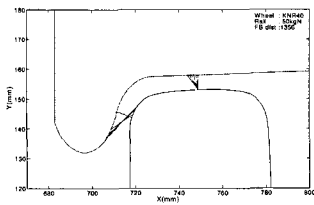
차륜과 레일형상간의 다양한 조합에 따른 기하학적 접촉특성을 분석하고자 접촉 해석을 수행하였다. 국내에서 적용중인 차륜과 레일의 형상은 각각 5종, 3종이지만 기존선구간에 운용되는 차륜답면형상에 한정하여 5종의 차륜답면형상과 50kgN 레일, 60kg레일 2종의 레일에 대하여 접촉조건 총 10가지 경우에 대하여 기하학적 접촉특성을 해석하였다.

기하학적 접촉특성 해석시, 해석조건은 윤축의 내면거리를 1,356mm, 궤간을 1,435mm로 가정하였으며 차륜의 답면형상과 레일두부형상 변화에 따른 기하학적 접촉특성을 해

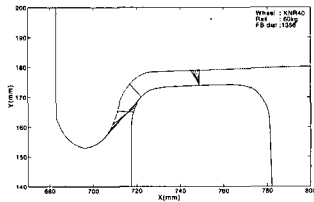
석하였다. 차륜답면과 레일두부의 형상은 도면에 의거하여 수치화하여 모델링하였으며, 차륜/레일간 기하학적 접촉점 해석은 자체 개발한 차륜/레일 기하학적 접촉특성 해석 프로그램을 활용하였다. 차륜과 레일간의 접촉점 해석은 레일은 고정시키고 윤축의 횡변위에 따른 레일과의 접촉점 위치를 해석하였다. 그리고 접촉점분포 데이터에 의거하여 차륜 구름반경차(rolling radius difference), 차륜접촉각차(contact angle difference), 접촉면적(contact area)과 같은 기하학적 파라미터를 산출하였다[1-4].

Fig. 3은 차륜과 레일의 형상 조합에 따른 기하학적 접촉점 해석을 수행하여 레일에 대한 차륜의 횡변위 운동에 대한 접촉점분포를 나타낸 contact patch 선도이다. Fig. 4~Fig. 9는 차륜과 레일간의 접촉점 분포에서 추출한 기하학적 파라미터에 대한 선도이다. Fig. 4, Fig. 5에서와 같이 동일 레일형상, 동일 내면거리에 대하여 차륜답면형상 변화시의 구름반경차는 KNR20h답면이 기울기가 가장 크며 KNR40답면의 기울기가 가장 작음을 알 수 있다. 이는 Fig. 3(e), (f)의 접촉점 분포에서 알 수 있듯이 KNR20h답면의 접촉점은 차륜플랜지와 레일게이지코너부로 집중 분포하게 되어 윤축 횡변위에 따른 좌우 차륜의 구름반경 변화를 크게 함으로서 구름반경차가 크게 나타난다. 이는 결국 구름반경차의 기울기인 등가답면구배를 크게 하는 요인이 된다. 반면, KNR40답면은 Fig. 3(a), (b)에서와 같이 접촉점 분포가 차륜답면 중앙, 레일두부 중심에 분포하게 되어 윤축 횡변위에 따른 좌우 차륜의 구름반경 변화가 상대적으로 작게 나타남으로 인하여 구름반경차가 작게 나타나게 되고 그 기울기인 등가답면구배를 작게 한다. 또한, Fig. 6, Fig. 7에서와 같이 윤축 횡변위에 따른 좌우차륜의 접촉각차도 Fig. 4, Fig. 5의 구름반경차와 유사한 경향을 보이고 있다. 이 역시 각 차륜답면형상과 레일 형상간의 접촉점 분포에 기인한 결과라 할 수 있다. Fig. 8, Fig. 9는 윤축 횡변위에 따른 접촉면적을 나타낸다. 기존선 운용 답면형상의 경우 플랜지 접촉면적인 ±5mm 이내에서는 KNR20h답면의 접촉면적은 KNR40, KNR20답면에 비하여 작게 나타나고 있음을 알 수 있다, 이는 Hertz의 접촉이론에 의한 것으로 KNR20h답면의 접촉점 분포가 차륜플랜지와 레일게이지코너부에 집중됨으로 인하여 접촉점이 답면중앙, 레일두부에 집중 분포하는 KNR40, KNR20답면에 비하여 Hertz의 접촉이론과 관련된 반경 변화가 큼에 기인한 결과로 볼 수 있다[5].

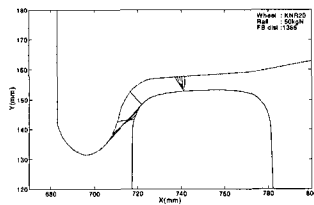
고속차량의 차륜답면인 GV40답면과 XP55답면은 기존철도 차량용 답면에 비하여 플랜지두께가 작으므로 차륜과 레일간의 유간이 커 플랜지접촉이 ±7mm영역에서 나타나고 있다. 접촉점 분포는 GV40답면에 비하여 XP55답면이 차륜



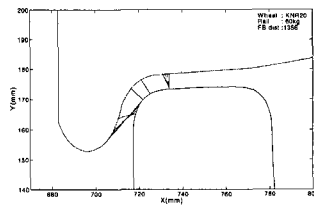
(a) KNR40 Wheel : 50kgN Rail



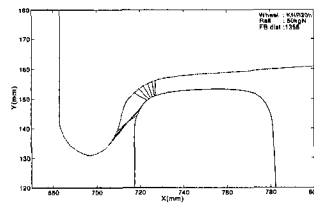
(b) KNR40 Wheel : 60kg Rail



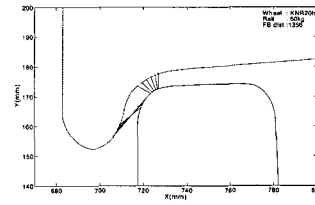
(c) KNR20 Wheel : 50kgN Rail



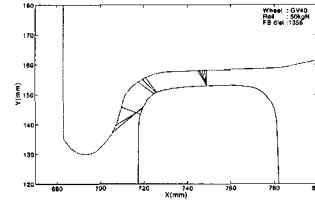
(d) KNR20 Wheel : 60kg Rail



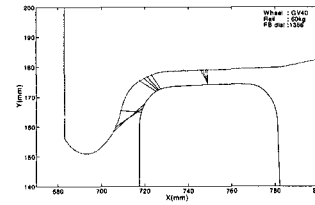
(e) KNR20h Wheel : 50kgN Rail



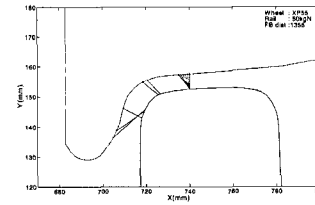
(f) KNR20h Wheel : 60kg Rail



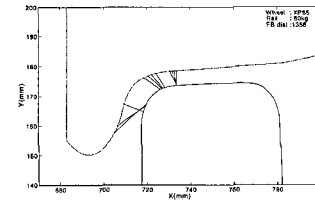
(g) GV40 Wheel : 50kgN Rail



(h) GV40 Wheel : 60kg Rail



(i) XP55 Wheel : 50kgN Rail



(j) XP55 Wheel : 60kg Rail

Fig. 3. Contact patches for the combination of wheel/rail profiles

플랜지부와 레일 게이지코너부에 집중되고 있음을 알 수 있다. 그러나 고속철도차량용 답면형상임에도 KNR40답면의 접촉특성과 비교하여 보면 윤축 횡변위에 따른 기하학적 파라미터 변화가 KNR40답면의 접촉특성에 비해선 다소 양호

한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이로 인하여 차량 곡선 주행시 레일과의 적응성측면에서 보면 원추형 답면인 KNR40답면에 비해선 양호한 주행특성을 나타낼 것으로 예측된다.

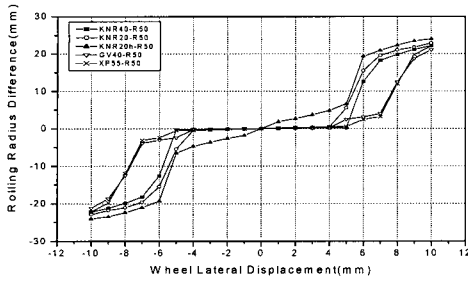


Fig. 4. Rolling radius differences on contact condition with 50kgN rail

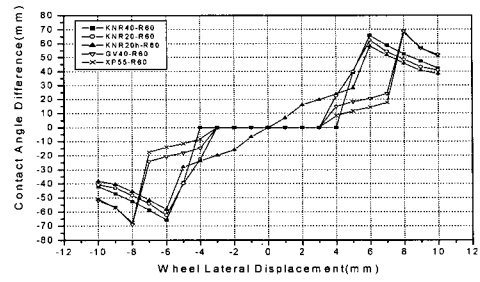


Fig. 7. Contact angle differences on contact condition with 60kg rail

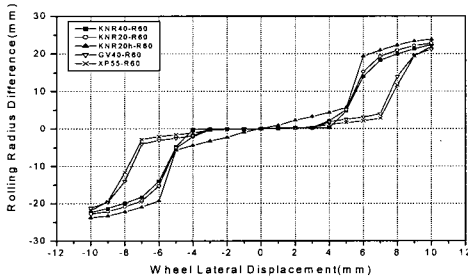


Fig. 5. Rolling radius differences on contact condition with 60kg rail

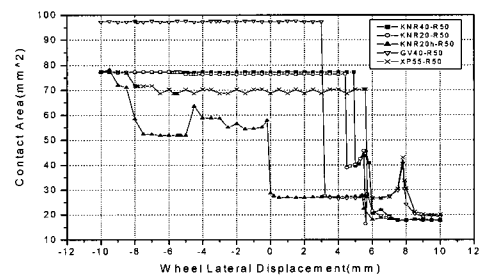


Fig. 8. Contact areas on contact condition with 50kgN rail

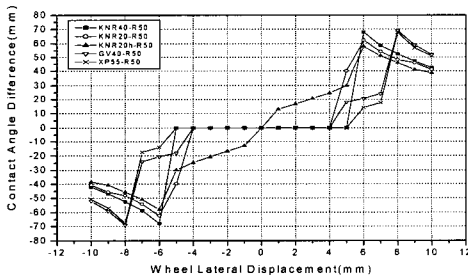


Fig. 6. Contact angle differences on contact condition with 50kgN rail

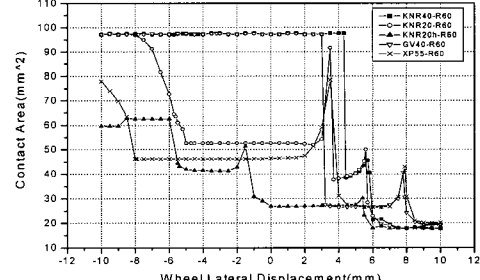


Fig. 9. Contact areas on contact condition with 60kg rail

4. 차량 동특성 해석

차륜과 레일의 형상 조합에 따른 기하학적 접촉조건이 차량의 주행동특성에 미치는 영향을 분석하고자 동특성해석을 수행하였다.

해석조건은 차종 및 궤도, 속도 등에 관련된 해석조건은 고정시키고, 차륜, 레일 형상간의 조합만을 변경하면서 차륜/레일 접촉조건이 차량의 동특성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 본 해석에 활용한 해석S/W는 철도차량 동특성 해석 전용프로그램인 영국 AEA Technology사의 VAMPIRE

(Vehicle dynAmic Modelling Package In a Railway Environment, ver4.1)를 사용하였다[6]. 차종은 기존철도 여객 차량의 주류를 이루고 있는 KT23대차 적용 무궁화객차를 대상으로 하였으며 차륜/레일 접촉조건에 따른 곡선주행 성능, 차량안정성, 승차감에 대하여 해석하였다. Table 1은 차량모델 구성에 활용한 특성치이며 Fig. 10은 차량모델을 나타낸다. Fig. 11은 곡선주행 해석에 적용한 곡률반경 400m의 궤도모델을 나타내며, Fig. 12는 임계속도 해석에 적용한 궤도모델을 나타낸다.

Table 1. Properties of vehicle model

구분	특성치	단위	물성치
차체	길이	m	23.5
	질량	ton	26.6
	Roll관성 모우멘트	Mgm ²	73.54
	Pitch관성 모우멘트	"	1257.2
	Yaw관성 모우멘트	"	1269
	레일면에서의 무게중심 높이	m	1.601
대차 Frame	질량	ton	2.12
	Roll관성 모우멘트	Mgm ²	1.10
	Pitch관성 모우멘트	"	1.10
	Yaw관성 모우멘트	"	2.20
	레일면에서의 무게중심 높이	m	0.57
	질량	ton	1.78
윤축	Roll 및 Yaw관성 모우멘트	Mgm ²	0.965
	Pitch관성 모우멘트	"	0.003
	차륜반경	m	0.43
주요 치수	대차중심간 거리의 반	m	7.1
	축간거리의 반	m	1.15
	1차스프링 횡간격의 반	m	0.965
	2차스프링 횡간격의 반	m	1.0
1차 스프링	전후방향 강성	MN/m	12.0
	횡방향 강성	"	4.90
	수직방향 강성	"	1.02
2차 스프링	전후방향 강성	MN/m	0.16
	횡방향 강성	"	0.16
	수직방향 강성	"	0.30
댐퍼	1차 수직댐퍼	MNs/m	0.037
	2차 수직댐퍼	"	0.020
	2차 수평댐퍼	"	0.039

Table 2. Results of dynamic analysis

Case	차륜/레일 조합	곡선주행성능			승차감(dB)		임계 속도 (㎞/h)	등가 답면 구배
		횡압 (kN)	윤증 감소율 (%)	탈선 계수	좌우	상하		
1	KNR40-50kgN	21.9	24.0	0.37	103.0	102.1	80	0.025
2	KNR20-50kgN	21.3	23.5	0.36	102.7	102.1	70	0.28
3	KNR20h-50kgN	16.4	23.8	0.27	101.2	102.1	50	0.635
4	GV40-50kgN	14.6	23.4	0.24	103.0	102.1	60	0.127
5	XP55-50kgN	18.7	23.7	0.31	103.3	102.1	60	0.055
6	KNR40-60kg	22.1	24.6	0.37	102.9	102.1	80	0.23
7	KNR20-60kg	21.6	23.3	0.36	102.8	102.1	70	0.324
8	KNR20h-60kg	17.3	23.2	0.29	101.1	102.1	50	0.555
9	GV40-60kg	14.6	23.4	0.24	103.0	102.1	60	0.188
10	XP55-60kg	17.7	23.0	0.30	103.1	102.1	60	0.129

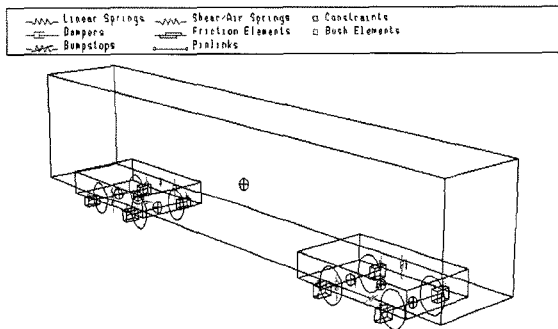


Fig. 10. Vehicle model

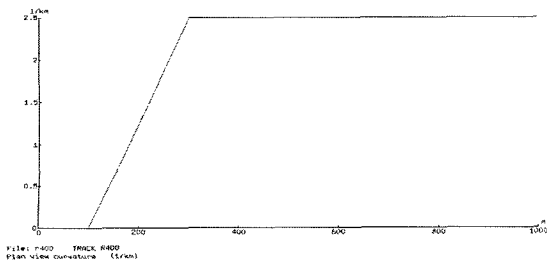


Fig. 11. Track model for curving analysis(400 m)

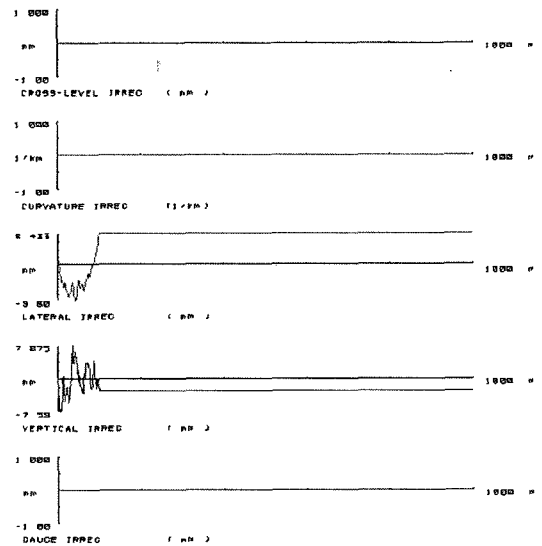


Fig. 12. Track model for hunting analysis

Table 2는 주행동특성 해석결과를 나타내는 표이며, Fig. 13~Fig. 17은 해석결과를 나타내는 그림이다. 곡선주행성능 해석은 차량의 곡선주행시를 가정하여 차륜에 미치는 횡

하중, 탈선안전도를 분석하기 위하여 수행한 해석기법이다. 해석조건은 급곡선이라 할 수 있는 곡률반경 400m의 궤도틀림이 없는 이상적인 곡선을 주행속도 90km/h로 통과할 경우로 설정하였다. 해석결과, Fig. 13과 같이 곡선 주행시 차륜에 작용하는 횡압을 보면 기존철도 차륜답면의 경우, KNR20h답면인 경우가 원추형답면인 KNR40답면, KNR20답면에 비하여 작게 나타나고 있다. 고속철도적용 차륜답면의 경우엔 GV40답면인 경우가 XP55답면에 비하여 작음을 알 수 있다. 레일의 형상 변화에 대한 횡압의 영향은 XP55답면을 제외하고는 모든 답면에서 횡압이 미소하게 커지는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 14, Fig. 15와 같이 차량의 탈선안전도와 관련된 수치를 살펴보면 윤중감소율(ΔQ), 탈선계수(P/Q) 모두 접촉조건에 따라 다소 차이가 있으나 윤중감소율 허용치 최대 80%, 탈선계수 허용치 1.1과 비교하면 매우 적은 수치를 나타내고 있으며 따라서 안전한 주행특성을 나타내고 있다고 할 수 있다.

Fig. 16은 차륜/레일 접촉조건에 대한 차량의 안정성을 분석하기 위하여 차량의 한계성능인 임계속도 해석을 수행한 결과이다. 본 해석은 횡방향 궤도틀림이 설정된 궤도모형을 일정속도로 주행시켜 차량에 외란을 부여한 후, 차량모델

각 요소의 횡방향 거동의 시간감쇠를 파악하여 계의 동적 안정성을 분석하는 기법이다. 해석결과, 모든 답면형상은 기존철도차량의 설계속도인 150km/h(41.7m/s)를 상회하고 있음을 알 수 있다. 답면형상별 임계속도 차이를 보면 원호형 KNR 20h답면 적용시에 원추형답면인 KNR40, KNR20답면을 적용한 조건보다는 임계속도가 저하하고 있음을 알 수 있다. 고속철도적용 차륜답면인 GV40, XP55답면을 적용한 경우에도 기존철도용 원추형답면인 KNR40, KNR20답면에 비하여 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 각 각의 차륜답면형상의 설계개념이 반영된 결과로서, 일반적으로 등가답면구배가 작아지면 차량의 임계속도는 증가하게 되어 고속주행시 안정성측면에서 우수하다는 이론적 결과와 부합하고 있음을 알 수 있다. 그러나 낮은 등가답면구배에도 임계속도가 답면형상에 따라 차이가 발생하는 것은 차륜답면과 플랜지부의 연결 영역이라 할 수 있는 플랜지목부에서의 형상 차이에서 비롯된 것이라 할 수 있다. 즉 등가답면구배 산정영역은 플랜지 접촉이 발생하지 않는 답면중앙부 접촉영역인 $\pm 5\text{mm}$ 이내에서 해석하므로 같은 등가답면구배라도 플랜지목 부의 형상 특성에 따라 횡방향 운동특성이 달라질 수 있다고 판단된다.

Fig. 17은 차륜/레일 접촉조건에 의한 승차감의 영향 분석

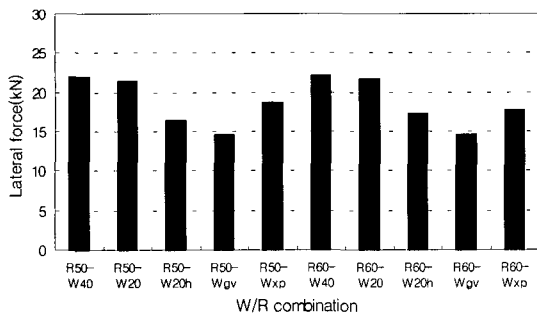


Fig. 13. Lateral forces

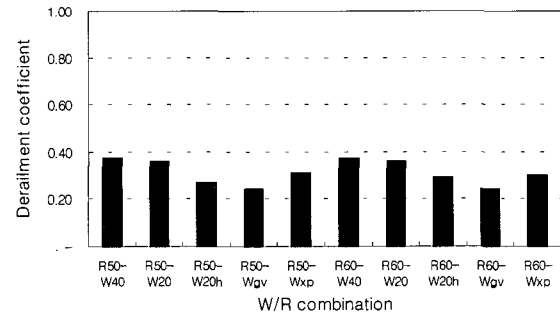


Fig. 15. Derailment coefficient

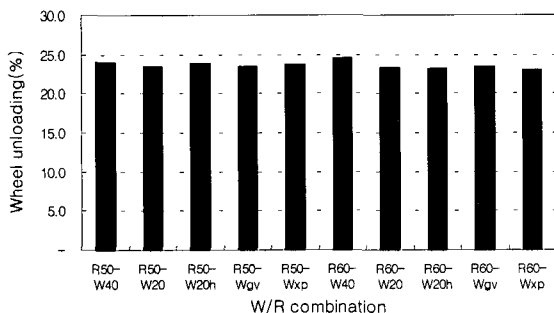


Fig. 14. Wheel unloading rate

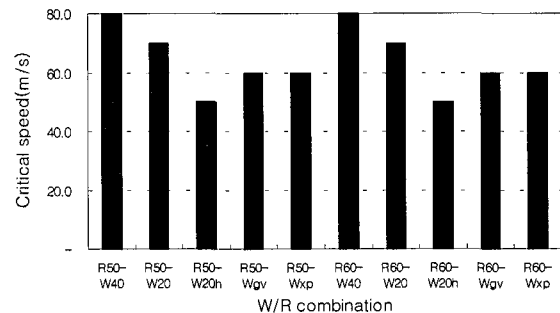


Fig. 16. Critical speed

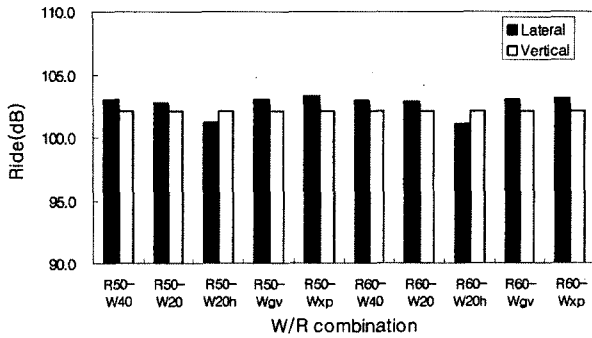


Fig. 17. Ride level

을 위하여 승차감 해석을 수행한 결과이다. 승차감 해석시, 국내 기존선로 일부구간을 샘플링한 해석구간에 대하여 120 km/h 주행시를 가정하여 차량 객실내 후부위치에서의 좌우 및 상하방향에 대한 승차감레벨을 산출하였다. 승차감해석을 위한 승차감필터는 UIC513에 의한 좌우 및 상하방향 weighting filter를 적용하였다. 해석결과, 상하방향은 일정한 승차감레벨을 나타내고 있다. 좌우방향은 KNR20h답면 적용시가 타 답면형상을 적용한 경우보다 미소하게 저감되고 있음을 알 수 있다. 또한, 레일의 형상 변화에 따른 승차감 특성 변화는 매우 미미하여 전반적으로 등가수준을 보이고 있다고 할 수 있다.

5. 결론

국내 철도에 적용중인 차륜답면 및 레일의 형상을 대상으로 다양한 차륜/레일 조합에 따른 기하학적 접촉특성 및 차량동특성에 미치는 영향 분석 연구를 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 특성을 파악할 수 있다.

- (1) 곡선선로 적응성 측면에서는 기존 철도차량 적용 답면인 경우 KNR20h답면이 KNR40, KNR20답면에 비하여 횡압 저감효과가 우수하게 나타나 차륜 및 레일 손상 저감 측면에서 양호할 것으로 판단된다. 고속철도용 답면

인 GV40, XP55답면의 경우에도 기존철도용 원추형답면인 KNR40답면에 비해선 양호한 곡선 주행특성을 보일 것으로 예측된다.

- (2) 등가답면구배 특성은 기존철도적용 KNR20h답면의 등가답면구배가 크게 나타나고 있으며 이로 인하여 차량 안정성관련 인자인 임계속도 발생 영역이 타 답면에 비하여 작게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이는 차륜답면과 레일두부형상간의 기하학적 접촉특성에 기인한 것으로 차륜답면의 구배와 더불어 차륜플랜지목부의 형상이 접촉 특성에 큰 영향을 미침을 의미한다.
- (3) 차륜/레일의 접촉조건에 의한 주행동특성의 영향은 레일형상 변화보다 차륜답면형상이 변화할 경우 크게 나타나고 있다. 따라서 레일형상에 적합한 차륜답면형상 적용이 차량의 안정된 주행특성 확보에 효율적일 것으로 판단된다.

따라서, 상기 연구 결과는 기존 철도차량의 차륜답면 변경시 차륜관리 및 주행성능 확보 측면에서 효율적인 방안으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 향후 기존선 주행을 목적으로 하는 신차 개발시 운용 선로에 적합한 차륜답면형상 선정이나 답면형상 개발 분야에도 유용한 결과로 활용될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Nefzger, "Development of the S1002 Wheel Profiles on the DB Network", ERRI Report DT81(C116)E
2. R. Heller, N.K. Cooperrider, "Users Manual for Asymmetric Wheel/Rail Contact Characterization Program", 1977
3. "Calculation of Equivalent Conicities for the S1002 Wheel Profile on UIC60 Rails", ERRI Report DT54/E
4. "Interaction between vehicle and track", ERRI Report C116/RP6/E
5. Vijay K. G., Rao V. D., "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press, 1984
6. VAMPIRE User Manual, AEA Technology, 2003