

원호형 차륜담면형상(안) 설계 및 현차시험 결과 Arc-type Wheel Profile Design and Test Results

허연무¹ · 권성태² · 이찬우³ · 구동회⁴

Hyun-Moo Hur · Sung-Tae Kwon · Chan-Woo Lee · Dong-Hoe Goo

Abstract

The rolling-stocks on conventional line have suffered wheel problems due to the incompatibility between wheel and track condition. Especially, The 1:40 coned wheel profile's wear is very severe and these increase wheel maintenance cost. Thus we designed several arc-type wheel profiles coned 1:20 to reduce the wheel flange wear and analyzed the dynamic performance of designed profiles. Tests carried out in service line to analyse the dynamic performance and verify the wear reduction for two cases of profiles. Test results shows the equal level of dynamic performance and the improvement of wheel flange wear compared with the conical wheel profile coned 1:40.

Keywords : Wheel Profile(차륜담면형상), Flange Thickness(플랜지두께), Flange Wear(플랜지마모), Equivalent Conicity(등가담면구배), Conventional Line(기존선)

1. 서론

국내 기존선 철도차량에 적용중인 차륜담면형상은 Fig. 1~Fig. 3과 같이 원추형 1/40담면, 1/20담면, 원호형 1/20 heumann담면 3종류가 있다. 1/40담면은 객차, 새마을동차, 디젤기관차, 전기기관차에 1/20담면은 화차, 기관차에 적용되고 있으며, 1/20heumann담면은 객차, 전동차에 적용되고 있다. 원추형담면 적용차량은 차량의 1차 현가계특성에 따라 그 특성이 다르지만 일반적으로 직선구간에서 차량의 고속주행시 사행동에 대한 주행안정성은 우수한 반면 곡선구간 주행시 차륜 플랜지의 2점접촉을 유발하여 차륜횡압의 증가를 초래하고, 이는 차륜 플랜지부의 직립마모 현상을 초래하여 주행안전성 및 차량의 동적특성을 저하시키는 요인으로 작용한다. 이러한 원추형담면의 문제점을 개선하기 위해선 차륜의 담면구배를 크게하는 것이 효과적이지만 이는 역으로 차량의 고속주행성능을 저하시키게 된다[1]. 이러한 양자의 상충되는 특성을 양립할 목적으

로 원추형담면의 단점을 보완한 원호형 차륜담면형상 개발이 세계 각국에서 활발히 진행되고 있다[2,3].

본 논문에서는 국내 기존선 차량에 적용중인 차륜담면형상의 직립마모현상을 개선하기 위한 한가지 방안으로 새로운 차륜담면형상안을 제안하고자 한다. 이를 위하여 여러개의 후보담면형상안을 설계하였으며 이에 대한 기하학적 특성, 고속 및 곡선주행시의 주행특성 해석, 차륜담면 접촉부에서의 응력분포 해석등을 수행하였다. 해석결과 그 특성이 양호한 2가지 담면형상안을 제시하였으며, 담면형상안의 효용성 분석을 위한 현차시험을 수행하였다. 현차시험은 새로운 담면형상안 적용에 따른 주행특성 변화를 파악하기 위한 기존선 주행시의 주행동특성시험과 일정기간 실선로

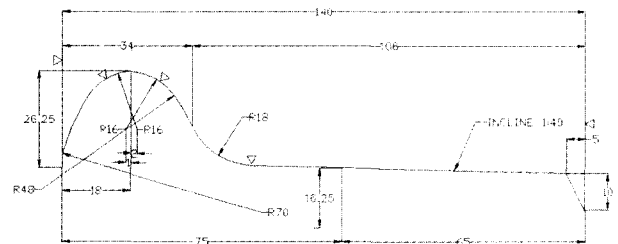


Fig. 1. Conical type 1/40 profile

1 정회원, 한국철도기술연구원 차량기계연구본부, 선임연구원
2 정회원, 한국철도기술연구원 철도안전연구시험센터, 선임연구원
3 정회원, 한국철도기술연구원 차량기계연구본부, 책임연구원
4 정회원, 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단, 책임연구원

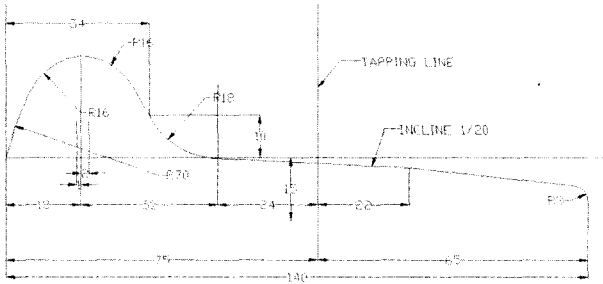


Fig. 2. Conical type 1/20 profile

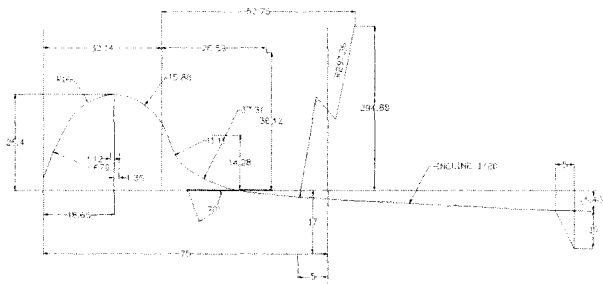


Fig. 3. Arc-type 1/20heumann profile

에서의 실운용시험을 통한 차륜마모특성시험을 수행하였다. 실차에 적용한 현차시험 결과 제안한 담면형상안에 대한 효용성을 확인하였다.

2. 담면형상안 설계

2.1 기존차륜 마모특성

담면형상안 설계에 앞서 기존 차륜담면형상의 직립마모형상을 분석하고자 원추형 1/40담면 적용차량의 마모특성을 분석하였다. 원추형 1/40담면은 Fig. 4와 같이 플랜지부의 급격한 마모현상을 나타내어 원형삭정 후 2개월, 약 50,000km주행시 4~5mm의 플랜지마모가 발생한다. 또한

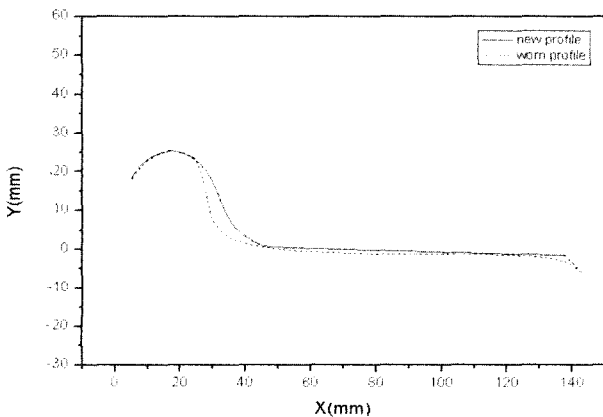


Fig. 4. Flange wear of conical Profile

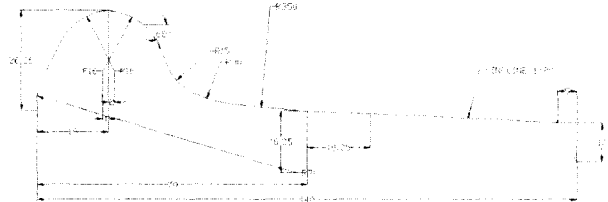
플랜지부의 경사각도 초기 66°에서 75°로 급격히 진전되어 플랜지부의 직립마모로 인한 차륜조기 삭정 및 동적성능 저하의 요인이 된다[4].

2.2 담면형상안 설계

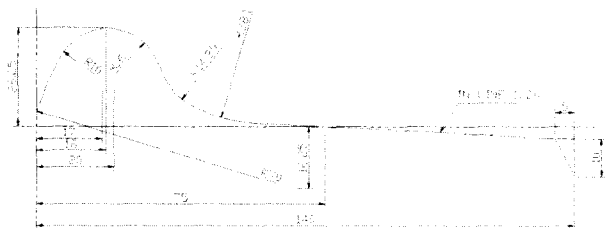
원추형 차륜담면의 직립마모특성을 개선하고자 새로운 여러개의 후보담면형상안을 설계하였다. 담면형상안 개발은 국내 기존선 운용속도조건에 부합하고 마모특성이 양호한 최고속도 150km/h급 원호형담면형상 개발을 목적으로 하였다. 설계개념은 원추형담면의 직립마모 현상이 두드러진 플랜지부 부근을 원호형 곡선들로 보완함으로써 곡선부



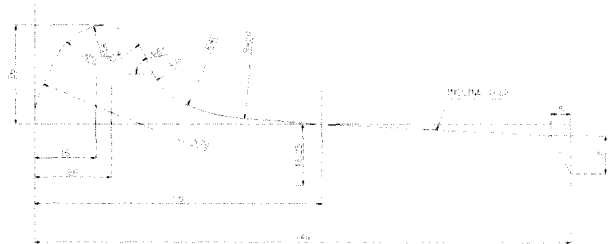
(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3



(d) Case4

Fig. 5. Wheel profiles

주행시 응력집중에 의한 손상을 예방하고 직선로 고속주행시 안정된 주행성능을 도모하고자 하였다.

각 답면형상안은 선로주행시 선로구조물과의 간섭방지 및 주행안전성 확보를 위하여 기본적으로 국유철도건설규칙의 제66조(차륜) 및 제67조(플랜지) 조항에 근거하여 차륜관련 치수기준을 적용하였다[5]. 플랜지목에서 답면 중앙까지의 답면형상은 2~3개의 크기가 다른 원호로 구성되며 답면부의 구배는 모두 1/20구배로 하였다. Fig. 5는 4가지 후보답면형상안을 나타낸다.

2.2 기하학적 특성

답면형상안에 대한 주요 치수와 기하학적 접촉특성을 분석하였다. 차륜치수는 Table 1과 같이 플랜지두께FT(flange thickness, mm), 플랜지높이FH(flange height, mm), 플랜지경사각FA(flange angle, deg)에 대한 치수를 구하였다. 차륜/레일간의 기하학적 접촉특성 파악을 위한 등가답면구배(equivalent conicity) 해석시 레일은 궤간 1435mm, 원형 50kgN레일로 하였으며, 차륜내면거리는 1356mm, weighting function은 평균 0, 표준편차 2.5인 정규분포함수하여 2σ의 범위까지 산출하였다[6,7].

Fig. 6~Fig. 8은 각 각 답면형상안에 대한 rolling radius

Table 1. Geometric characteristics of profiles

답면형상안	FT (mm)	FH (mm)	FA (deg)	등가 답면구배
기준1/40답면	34.3	25.3	69.4	0.025
Case1	34.3	26.1	65.0	0.18
Case2	34.5	26.2	65.0	0.31
Case3	35.1	26.1	66.0	0.50
Case4	33.0	26.0	68.0	0.27

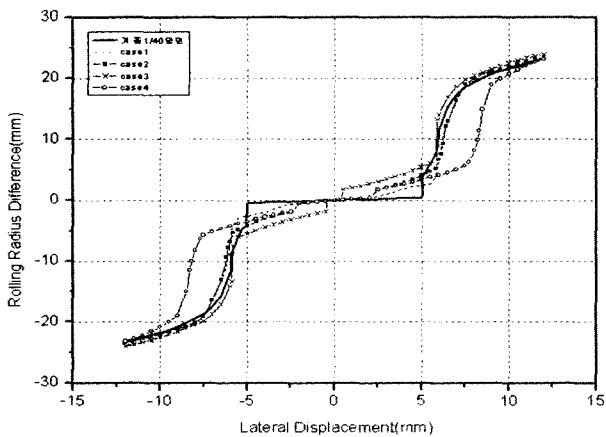


Fig. 6. Rolling radius difference of profiles

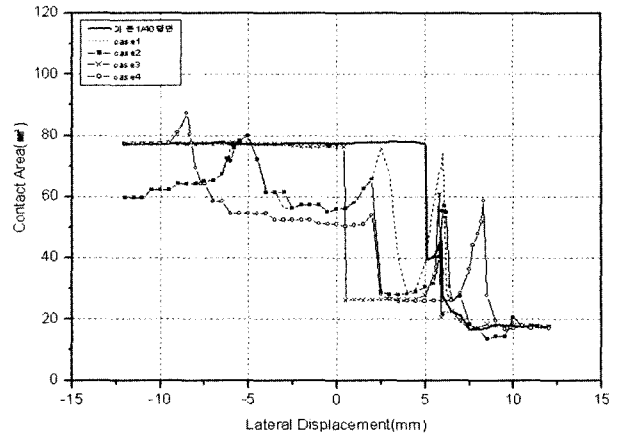


Fig. 7. Contact area of profiles

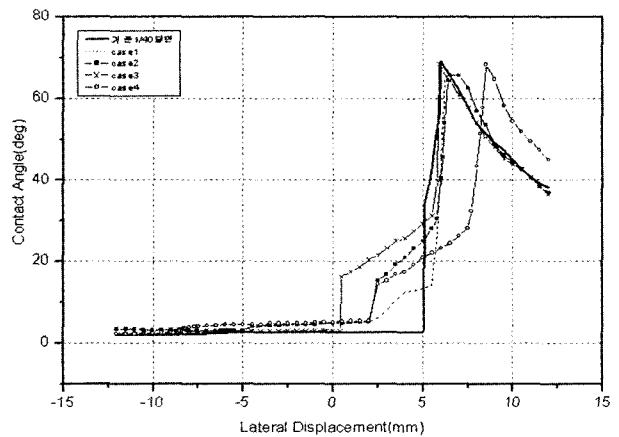


Fig. 8. Contact angle of profiles

difference, 접촉면적, 접촉각을 해석한 선도이다. 기존 원추형 1/40답면에 비하여 원호형인 답면형상안은 윤축의 횡변위에 대한 rolling radius difference의 변화가 플랜지접촉 이전의 영역인 -5~5mm구간에서 큼을 알 수 있다. 또한, 차륜의 접촉면적은 플랜지접촉이 시작되는 6mm이후구간에서 기준답면에 비하여 답면형상안의 접촉면적이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 해석결과는 곡선주행시 차륜/레일 접촉특성을 향상시키기 위한 원호형 답면형상안의 설계개념에 기인한 결과로 분석된다.

2.4 주행동특성, 응력분포 해석

설계한 후보답면형상안에 대한 주행안정성 분석, 차륜플랜지마모와 관련된 곡선주행특성 분석을 위하여 동특성 해석을 수행하였다. 해석차종은 국내 고속객차의 대표차종인 KT23대차 적용 무궁화객차를 대상으로 하였다. 해석프로그램은 철도차량 동특성해석 분야의 대표적인 S/W인 영국 AEA Technology사의 VAMPIRE (Vehicle dynAMic Modelling

Package In a Railway Environment, ver4.1)를 사용하였다 [8]. 곡선주행성능해석은 곡선반경 400m의 급곡선을 90km/h 주행시로 가정하여 곡선주행성능 관련 인자를 해석하였다. 임계속도해석은 차량의 사행동(hunting)에 대한 횡방향 안정성을 분석하기 위하여 차량 주행시 횡방향 외란을 가하여 차량의 거동상태를 분석하는 비선형과도응답해석을 수행하였다.

Table 2의 동특성 해석결과에서와 같이 각 담면형상안은 탈선안전도와 관련된 탈선계수, 윤증감소율은 모두 기준치 이내에 있음을 알 수 있으며, 기존 원추형1/40담면과 비교하여 볼 때 다소 향상된 수치를 보이고 있다. 특히, 차륜의 플랜지마모와 직접적으로 관련된 인자인 횡압과 플랜지마모 지수를 보면 담면형상안의 횡압은 기존 원추형1/40담면에 비하여 13~32%정도 저감되며, 플랜지마모지수는 모두 0로 해석되어 곡선주행시 차륜의 2점접촉이나 급격한 플랜지 접촉현상이 발생하지 않을 것으로 예측된다. 이는 모두 원호형담면의 기하학적 특성에 기인한 것으로 해석되며, 따라서 각 담면형상안의 곡선주행성능은 기존 원추형1/40담면에 비하여 개선될 것으로 기대된다. 또한, 차량의 임계속도는 모든 담면에서 180km/h이상으로 해석되어 기존선 운용 차량의 최고속도조건인 150km/h이상을 충족하고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 곡선주행해석을 수행하여 담면형상별 횡압특성을 해석한 선도이다.

차륜과 레일 접촉시 담면형상안에 따른 응력분포를 분석하고자 차륜응력분포 해석을 수행하였다. 이를 위하여 차륜과 레일간의 차륜접촉점 해석을 수행하여 응력분포 해석에

필요한 접촉점 위치를 산출하였다. 하중은 곡선주행 해석시 산출한 결과를 활용하였다.

Table 2에서와 같이 차륜에 발생하는 최대 Mises응력의 전체적인 경향은 곡선구간에서 응력이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 곡선구간에서는 반경이 작은 레일의 원호와 차륜의 플랜지가 접촉하게 되므로 직선구간에 비하여 상대적으로 접촉면적이 작아지기 때문이다. 또한, 기존 원추형 1/40담면의 경우 직선구간과 곡선구간에서의 최대응력값의 차이가 심한 반면 원호형 담면은 그 차이가 상대적으로 작음을 알 수 있다.

원호형 담면은 여러 개의 원호로 구성된 담면이므로 직선 구간이나 곡선구간이나 원호 대 원호의 접촉이 발생하는 반면, 원추형 담면은 직선구간에서는 원호 대 직선, 곡선구간에서는 원호 대 원호의 접촉이 발생하기 때문이다. 또한, 직선구간에서 기존 원추형담면의 응력값이 적게 발생하는 것은 직선구간에서 차륜/레일 접촉시 접촉점 위치에 의하여 접촉면적이 크게 발생함에 기인한 것이라 할 수 있다. 특히 4가지의 원호형담면 설계안 중에서도 Case4의 담면은 곡선 구간에서 낮은 응력값을 보여 플랜지 마모에 대하여 양호한 특성을 보일 것으로 예측된다. Fig. 10은 Case4담면형상안

Table 2. Results of dynamic and FEM analysis

담면 형상 안	등가 담면 구배	곡선주행성능				차량 임계 속도 (km/h)	차륜응력 (MPa)		비고
		횡압 (kN)	윤증 감소 율 (%)	탈선 계수	마모 지수		직선 구간	곡선 구간	
1/40 담면	0.025	21.2	23.6	0.35	107	180 이상	758	999	
Case 1	0.18	18.4	23.0	0.31	0	180	914	1,138	
Case 2	0.31	17.0	23.4	0.29	0	180	928	992	시험안 (2안)
Case 3	0.50	18.0	24.2	0.30	0	180	853	1,075	
Case 4	0.27	14.3	22.5	0.24	0	180	904	903	시험안 (1안)
기준			80%	1.1		150 이상			

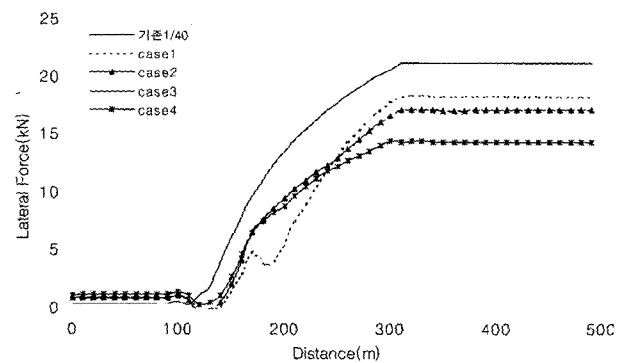


Fig. 9. Lateral force of curving analysis



Fig. 10. Stress at contact point(case4)

에 대한 곡선주행시 차륜/레일 접촉점에서의 응력분포 선도 이다[9].

4. 현차주행시험

4.1 시험조건 설정

답면형상안 해석결과에 의거하여 곡선구간에서의 주행동 특성, 응력특성이 양호한 Case2(2안), Case4(1안)를 대상으로 답면형상안의 효용성 검증용을 위한 현차적용시험을 수행하였다. 국내 대표적 여객차량인 무궁화객차를 시험차량으로 선정하였으며 상기한 2종의 답면형상안과 기존원추형 1/40답면을 시험차량의 차량에 적용하였다. 답면형상을 구현하기 위하여 답면형상안 삭정을 위한 모방자를 설계, 제작하였고 차륜전삭기에 취부하여 시험차륜을 삭정하였다. Fig. 11은 차륜모방선반인 차륜전삭기를 이용하여 시험차륜을 삭정하는 전경을 나타낸다.

4.2 주행동특성시험

답면형상에 따른 차량주행특성 영향 분석을 위하여 시험차량 3량을 시험열차에 동일편성하였으며 차량 각 부위의 진동가속도신호와 차륜의 진동소음을 측정하였다. 진동특성분석을 위하여 가속도계를 차륜 축상, 후부대차 상부 차체바닥에 좌우/상하방향으로 취부하여 신호를 취득하였다. 소음계측을 위하여 마이크로폰을 차륜에 인접한 대차에 취부하여 계측하였다. 진동데이터 분석은 KS R 9160 철도차량의 진동특성-측정방법에 의한 전진폭평균 분석방법에 의하였으며, 승차감은 UIC 513의 승차감필터를 적용하여 분석하였다. Fig. 12는 본 시험을 위하여 조성된 시험열차 편성을 나타낸다.

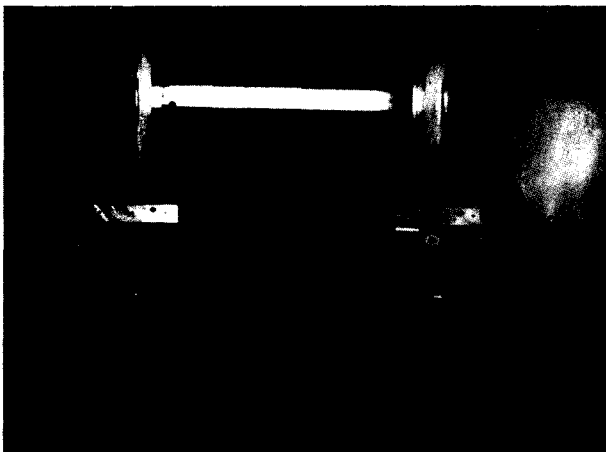


Fig. 11. Wheel machining of test vehicle

차량진동특성 분석결과, 차체진동은 Fig. 13~Fig. 14와 같이 좌우방향, 상하방향 모두 기존 원추형1/40답면 적용차량의 차체진동특성과 비교하여 등가의 진동특성을 나타내며 양호~우수구간에 해당하고 있음을 알 수 있다. Fig. 15와 같이 차체진동을 승차감레벨로 분석한 결과에서도 기존 원추형답면 적용차량에 비하여 1dB 내외의 편차를 보여 등가 수준의 승차감특성을 보이고 있다. 따라서 답면형상안 적용에 따른 차량주행동특성은 기존원추형답면 적용차량과 등가수준으로 평가되었다.

기존원추형답면 차륜과 답면형상안 적용차륜에 대한 차

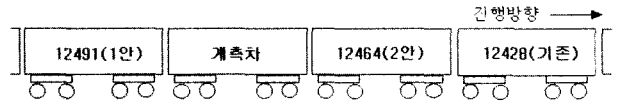


Fig. 12. Test train

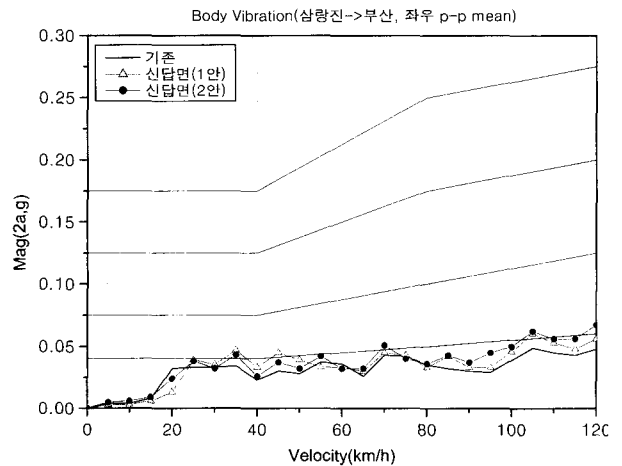


Fig. 13. Carbody lateral vibration(p-p mean)

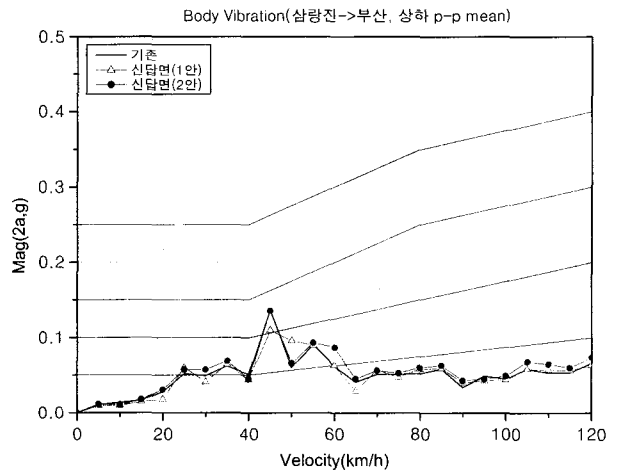


Fig. 14. Carbody vertical vibration(p-p mean)

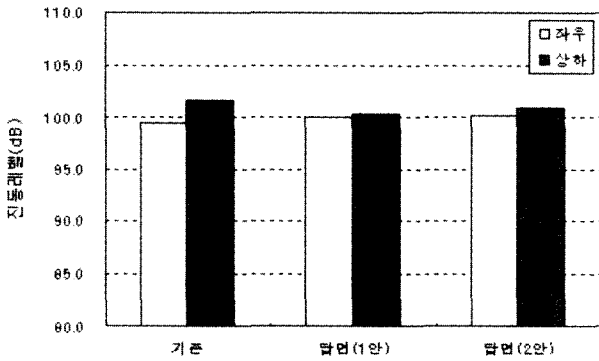


Fig. 15. Ride level of test vehicle

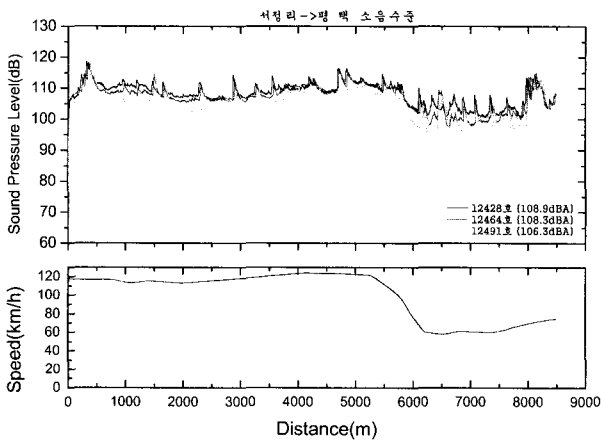


Fig. 16. Sound pressure level of test profiles

량하부소음시험을 수행하여 분석하여 본 결과, Fig. 16에서와 같이 기존원추형담면 적용차륜에 비교하여 답면형상안 2안 적용차륜의 경우는 소음저감 효과가 미미하지만 답면형상안 1안 적용차륜의 경우 직선구간에서 1.7~3.3dBA, 곡선구간에서 1.4~2dBA로 소음저감에 효과가 있는 것으로 나타나고 있다. 이는 앞서 해석한 결과에서와 같이 답면형상안이 기존원추형담면에 비하여 레일과의 접촉특성이 양호한 결과에 기인한 다고 사료된다.

4.3 차륜마모특성시험

답면형상안의 마모특성을 분석하기 위하여 시험차량을 기존선 서울~부산구간에 투입하여 약 8개월간 실운용하였다. 시험기간 중 총 주행거리는 약 180,000km이며 주기적으로 차륜의 형상과 상태를 계측하였다. 각 시험차량의 8개의 차륜에 대하여 플랜지두께, 플랜지각, 등가담면구배의 변화를 분석하였고 이를 평균하여 각 시험차량의 대푯값으로 하였다. Table 3은 이에 대한 분석결과이다.

Fig. 17에서와 같이 차륜플랜지마모량은 약 180,000km 주행시 기존원추형담면이 4.76mm임에 반하여 1안 1.1mm,

Table 3. Flange wear of test vehicle

주행거리	차호	플랜지마모량(mm)			플랜지경사각(deg)		
		기존	1안	2안	기존	1안	2안
0 km		0.00	0.00	0.00	65.95	67.10	66.85
31,666 km		1.86	-0.02	0.32	76.18	67.98	67.93
101,367 km		3.82	0.64	1.28	76.71	70.60	73.55
182,978 km		4.76	1.10	1.75	76.48	72.81	75.67

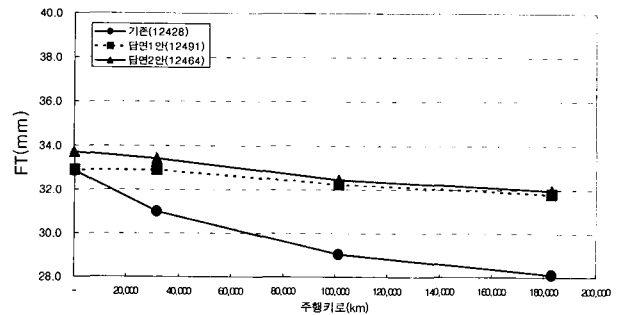


Fig. 17. Flange wear of test profiles

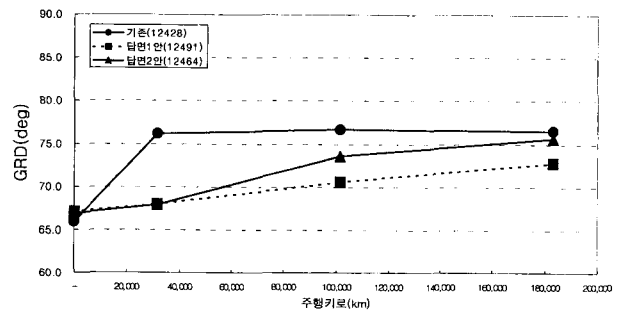


Fig. 18. Flange angle of test profiles

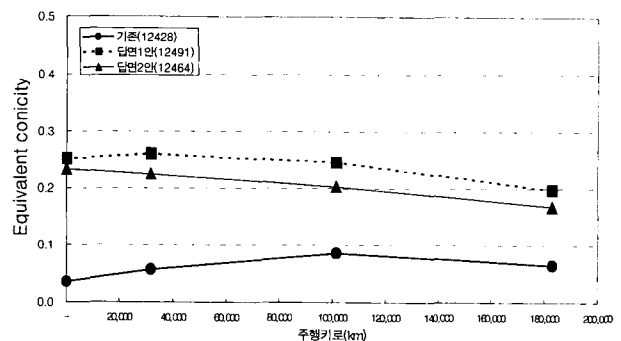


Fig. 19. Equivalent conicity of test profiles

2안 1.75mm로 기존원추형1/40담면의 23%~37% 수준의 마모를 보이고 있다. 또한 Fig. 18의 플랜지경사각 변화를 살펴보면, 기존차륜이 플랜지부의 급격한 마모로 약 50,000km 주행시 65°에서 75°로 급격히 변화함에 비하여 1안, 2안 모두 서서히 경사각이 변화하여 직립마모현상이 발생하고 있

지 않음을 알 수 있다.

등가답면구배의 변화는 Fig. 19와 같이 기존원추형답면이 0.035에서 최대 0.086으로 증가함에 비하여 1안, 2안은 0.25에서 0.2이하로 서서히 감소하고 모두 0.3이하의 영역안에 있음을 알 수 있다. 답면형상안의 등가답면구배 감소는 원호형답면의 일반적 마모특성을 나타내는 결과로 판단되며 차륜마모로 인한 차량사행동에 미치는 영향은 모든 답면에 서 크지 않을 것으로 예측된다. 그 외 시험차량 실선로 운용에 따른 검수측면의 이상은 발견되지 않았다[10].

6. 결 론

본 논문은 국내 기존선 차량에 적용되고 있는 원추형 차륜답면의 과도한 직립마모현상을 개선하기 위하여 국내 기존선 차량 운용조건에 적합한 원호형 답면형상안을 설계하였다. 이를 위하여 다수의 답면형상안을 설계하였으며 이에 대한 기하학적 특성, 주행특성 및 응력특성을 해석하였으며 곡선주행특성이 양호한 2가지 안에 대하여 현차주행시험과 일정기간의 실운용시험을 거쳐 제안한 답면형상안에 대한 효용성을 확인하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 현차시험에 적용한 2개의 원호형 답면형상안의 기하학적 특성은 기존 원추형1/40답면에 비하여 곡선주행성능 및 차륜접촉부 응력특성이 우수하고 기존선 운용차량의 최고속도조건을 충족하고 있다.
- (2) 답면형상안을 실차에 적용하여 주행동특성을 시험한 결과, 차체의 진동특성 및 승차감은 기존 원추형답면 적용 차량과 등가의 수준을 보이고 있다. 또한, 소음특성은 기존 원추형답면 적용차륜에 비교하여 답면형상안 2안 적용차륜의 경우는 소음저감 효과가 미미하지만 답면형상안 1안 적용차륜의 경우 직선구간에서 1.7~3.3dBA, 곡선구간에서 1.4~2dBA로 소음저감에 효과가 있는 것으로 나타나고 있다.
- (3) 시험차량을 기존선 서울~부산구간에 약 8개월간 투입하여 약 180,000km 실운용하였다. 답면형상안의 마모 특성은 차륜플랜지마모가 기존원추형답면 적용 차륜의

23%~37% 수준의 마모를 보이고 있으며, 플랜지경사 각 변화도 1안, 2안 모두 서서히 경사각이 변화하여 직립마모현상이 발생하고 있지 않음을 알 수 있다. 또한, 등가답면구배의 변화도 주행거리 증가에 따라 1안, 2안 모두 0.25에서 0.2이하로 서서히 감소하고 있는 안정된 경향을 보이고 있으며 그 외 시험차량 실선로 운용에 따른 검수측면의 이상은 발견되지 않았다.

- (4) 따라서 본 연구에서 제안한 2종의 답면형상안은 기존 원추형 1/40답면형상의 과도한 마모를 보완하기 위한 한가지 방안으로서 국내 기존선에서 운용중인 150km/h 급 이하 차량에 활용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 철도청 철도기술연구개발사업으로 지원되었으며 연구수행에 도움을 주신 철도청 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Vijay K. Garg, and Rao V. Dukkipati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press 1984.
2. 日本機械學會編, "鐵道車輛의 그이나믹스", 電氣車研究會, 1996.
3. Nefzger, "Development of the S1002 Wheel Profiles on the DB Network", ERRI Report DT81(C116)E.
4. 허현무, 이찬우, 권성태, 윤춘한, "기존선 차륜답면형상의 마모 패턴 분석", 한국철도학회 춘계학술대회, pp.651-655, 2003.
5. 철도청, "국유철도건설규칙", 2000.
6. R. Heller, N.K. Cooperrider, "Users Manual for Asymmetric Wheel/Rail Contact Characterization Program", 1977.
7. "Calculation of Equivalent Conicities for the S1002 Wheel Profile on UIC60 Rails", ERRI Report DT54/E.
8. AEA Technology Rail, "VAMPIRE User Manual", 2003.
9. 김의석, 허현무, 윤춘한, "차륜답면의 형상변화에 의한 접촉응력 분포 해석", 한국철도학회 춘계학술대회, pp.663-667, 2003.
10. 허현무 외, "경제적 차륜답면관리기술 개발 2차년도 최종보고서", 철도청, 2003.