

철도차량의 차륜마모 저감 Wheel Flange Wear Reduction of Rolling Stock

허현무*
Hur, Hyun-Moo

이찬우*
Lee, Chan-Woo

ABSTRACT

Like conventional railways, improving running performance of vehicle in curve is more effective than improving maximum speed to reduce traveling time. But some vehicles have problems concerning running performance in curve because of insufficient study for our conventional railway characteristics. So, these problems brought about increase of maintenance cost. This study was started to deliberate several plans to solve problems concerning running performance in curve. Some modifications of primary suspension and tests were carried out to improve curve negotiation. Here, we describe some results.

1. 서론

국내 기존선로와 같이 곡선이 많은 선로에서 차량의 주행속도를 향상시키기 위해서는 차량의 최고 속도 향상보다는 곡선주행성능을 향상시키는 것이 더욱 효율적이라 할 수 있다. 곡선주행성능은 선형 특성, 차량의 횡방향 현가계동에 좌우되며, 차륜마모, 차량구성품의 손상등 차량의 유지보수문제와 밀접한 관계를 갖고 있다. 즉, 원활한 곡선주행성능을 보유함과 더불어 차량의 유지보수가 용이하고 그 비용이 저렴하여야 함이 운전자측면에서 적합한 차량이라 할 수 있다.

그러나 국내 철도차량의 일부는 도입초기에 국내 선로특성에 대한 적응성 검토가 미흡하여 곡선주행성능 저하로 인한 차륜플랜지 과대마모, 대차구성품 조기 손상 등과 같은 차량운용상 여러 애로점을 겪고 있다. 이로 인한 차량 유지보수 시간 증가, 보수부품의 조기 교체 등을 초래하여 철도경영에 악영향을 미치는 유지보수비용의 증가 요인으로 작용하고 있다.

따라서, 본 연구는 곡선주행성능 저하 차량의 기존선로 주행시 발생하고 있는 여러 문제점을 개선시키기 위한 방안을 강구하기 위하여 수행되었다. 여러 개선방안 중 곡선주행 적응성 향상을 위한 횡방향 현가계 개선 작업등이 이루어 졌으며, 이에 대한 성능입증을 위한 시험이 수행되었다. 여기에 그 결과의 사례 일부를 소개하고자 한다.

2. 기존차량의 문제점

2.1 주요 현상

국내에서 운용중인 철도차량 중 곡선이 많은 기존선로 주행시 과도한 차륜마모나 대차 구성품 손상 사례가 발생하고 있는 일부 철도차량(이하 A형차량이라 함)을 대상으로 개선 방안을 모색하였다. A형차량에서 주요 발생하고 있는 문제점은 다음과 같다.

그림1~그림2에서와 같이 차륜플랜지의 과도한 마모가 발생하고 있으며 축상스프링 내통가이드 마모판 과대마모 이로 인한 축상스프링 내통가이드부 편마모, 그리고 볼스터앵커 부위 파손등 대차구성

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

품의 손상사례가 발생하고 있다. 이는 주로 곡선주행성능 저하로 인한 전형적인 특징을 보여주고 있는 현상이라 할 수 있다. 그림 3은 A형차량의 주요 제원과 대차형상을 나타낸다.

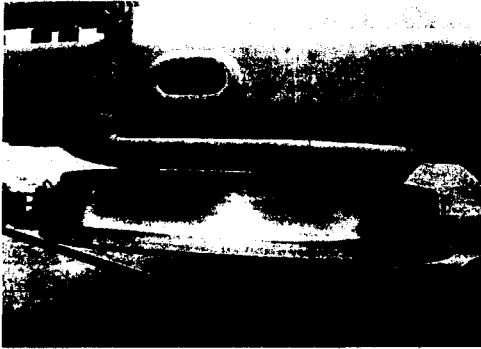


그림 1. 차륜플랜지 과대 마모 예

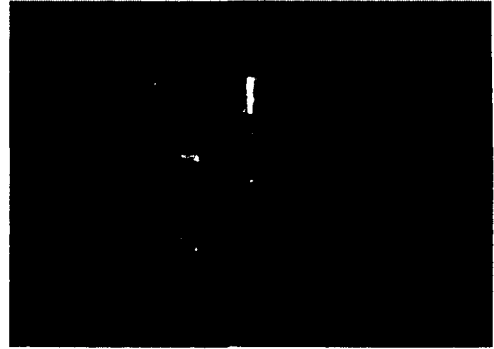
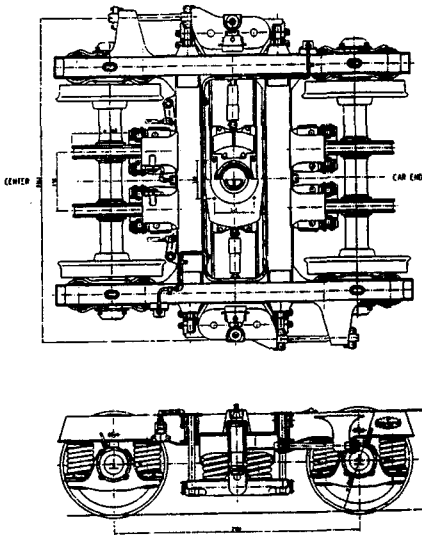


그림 2. 축상스프링 내통가이드 손상 예



항 목	제원 및 형식	비고
차체 길이	23.5 m	
차체 중량	40.0 ton	공차시
고정 축거	2.1 m	
대차중심간 거리	15.9 m	
최고 속도	150 km/h	
제동 방식	차축디스크형	
1차 현가계	축상 코일스프링	
2차 현가계	볼스타 코일스프링 수직, 수평댐퍼	

그림 3. A형차량의 대차 구조 및 주요 제원

특히, 곡선 적응성 저하로 나타나는 차륜마모는 선형특성, 차량현가계, 차륜 및 레일의 재질, 환경, 운용조건등 매우 여러 인자에 의한 복잡한 현상이라 할 수 있다. 따라서, 차륜마모특성을 파악하기 위해선 비교대상 시험차량을 선정하여 동일노선, 동일조건으로 실운용하면서 차륜의 마모도를 추적하는 것도 하나의 방법이라 할 수 있다.

A형차량의 차륜마모도를 분석하기 위하여 국내에서 운용중인 철도차량과의 차륜마모 비교시험을 수행하였다. 운용구간은 기존선로 중 곡선이 상대적으로 많은 중앙선 청량리~안동구간을 대상으로 하였으며, 시험차량은 A형차량과 국내 기존선로 운행을 통하여 곡선주행성능이 양호하다고 입증된 차량(이하 B형차량이라 함)으로 하였다. 운용조건은 동일 노선을 정기검수나 차량고장으로 인한 운행일 제한시한을 제외하고 동일 노선에서 1일 1왕복하는 조건으로 수행되었다.

도표 1에서와 같이 차륜 플랜지마모 평균은 A형이 3.75mm, B형이 1.12mm으로 각 차종의 운행거리 및 운행일수를 고려하지 않은 상태에서도 A형차량이 큰 값을 알 수 있다. 이 결과는 각 차종별 운행일수가 다소 상이하더라도 운용선로가 동일하므로 비교적 차종별 차륜마모특성이 잘 반영된 결과

라고 할 수 있다. 도표 1은 차종별 마모특성비교를 위해 시험차량의 운행거리 및 운행일수를 보정하여 마모량을 비교한 표로서, A형차량의 차륜 플랜지마모는 B형차량에 비하여 약 4배의 수준을 보이고 있어 매우 심각한 상태임을 알 수 있다.

도표 1. A형차량의 차륜 플랜지마모 비교

차종	Flange 마모량 (mm)	10만km당 마모량 (보정, mm)	A형차량 대비 마모수준(%)
A형	3.75	3.25	-
B형	1.12	0.82	25

2.2 원인 분석

A형차량에서 발생하고 있는 주요 문제점 분석을 위하여 국내에서 운용중인 다른 철도차량에 비교하여 동특성 해석을 수행하였다. 그 결과, A형차량의 곡선주행 시 횡압은 국내 기존선로 운행을 통하여 곡선주행성능이 양호하다고 입증된 B형차량에 비하여 약 13~30%의 횡압상승을 초래하였다. 또한, 횡압에 의한 차륜마모를 차륜과 레일 사이의 접촉면에서의 단위 회전거리당 행하여진 일로 표시하는 마모지수로 표현할 때, 이 마모지수 역시 A형차량이 B형차량에 비하여 약 3~46% 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서, A형차량의 곡선주행성능이 타 차량에 비하여 현저히 저하하고 있음을 나타내고 있는 결과라 할 수 있으며, 이는 A형차량의 대차구조가 1차, 2차현가계가 모두 코일스프링으로 되어 있고, 차체하중을 센터플레이트 습동부에 의해 지지되는 구조에 기인한 것으로서 곡선추종성 측면에서 구조적인 문제점을 안고 있음을 나타낸다. 이에 대한 반증으로 A형차량의 대차중심간 거리는 B형차량과 동일하고, 단지 1, 2차 현가장치가 고무스프링으로 되어 있는 B형차량은 A형차량의 차륜마모에 비해 약 25%정도의 플랜지마모 수준을 보이고 있다.

따라서, A형대차 적용차량은 곡선추종성 측면에서 가장 취약한 현가계로 구성되었음을 알 수 있으며, 조향성능을 좌우하는 횡방향 지지력이 구조적으로 매우 커서 차량운행시 플랜지 직립마모로 인한 차량안전운행에 문제유발 원인이 되고, 차륜원형 재생시 삭정량증가로 인한 차륜수명이 타 대차 적용차량에 비해 현저하게 저하될 것으로 예측할 수 있다.

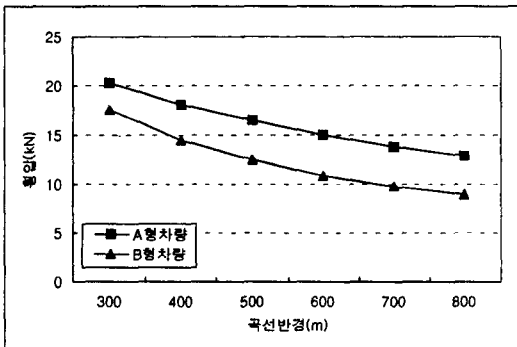


그림 4. A형차량의 횡압

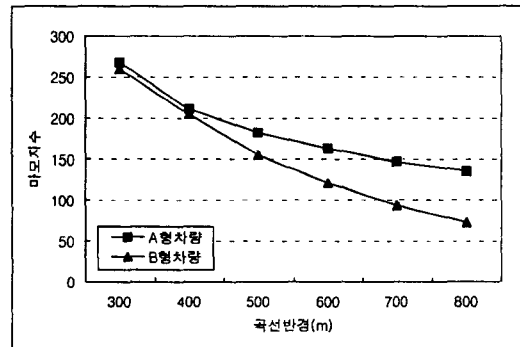


그림 5. A형차량의 마모지수

3. 개선방안 검토

A형차량의 곡선주행성능 저하로 인한 문제점을 개선하기 위하여 주요 개선안을 검토하였다. 도표 2는 개선안을 정리한 표로서 대차 1차현가계 구조변경, 차륜담면 형상 변경, 차축베어링 변경, 대차구성품에 대한 개선안에 관한 사항이다. 여기서 검토된 개선안은 현실적으로 적용 가능한 방안으로서 차륜횡압 감소, 차륜마모 저감, 대차구성품 손상 예방, 그리고 정비효율 향상에 기여할 것으로 기대된다.

도표 2. A형차량의 주요 개선 방안

검토 항목	개선 안	예상 효과
1차 현가계	1차현가계의 코일스프링을 고무스프링 형식으로 변경(전후, 좌우 강성 약화)	차륜 횡압 감소 차륜마모 저감 대차구성품 손상 예방 정비효율 향상
차륜담면형상	원추형 1/40형상에서 원호형 1/20 heumann형상으로 변경	
차축베어링	원통 볼베어링에서 원통실린더리퀴드 베어링으로 변경	
대차구성품	축상가이드 마모판 교체 주기 1Y로 변경 볼스터앵커 부쉬 사양에 허용변위 반영 센터플레이트 취부볼트 재질 변경 센터플레이트 마모판 일체형 적용	

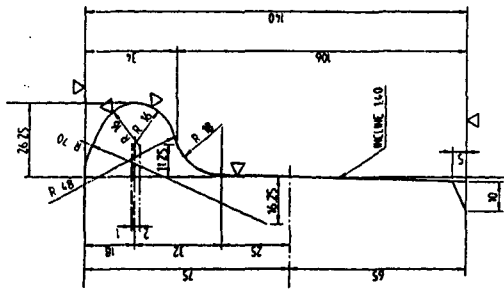
4. 개선 작업

3절에서 검토한 개선안 중 본 연구에선 대차 1차 현가계 개선과 차륜담면 형상변경안에 대한 개선 작업을 수행하였다. 1차현가계는 코일스프링에서 롤고무스프링 형식으로 변경하였으며, 이를 위하여 도표 3과 같이 롤고무를 취부하기 위한 축상스프링부에 대한 구조개선을 수행하였다. 또한 윤축의 조향기능을 강화하기 위하여 축상스프링의 특성치를 변경하였다.

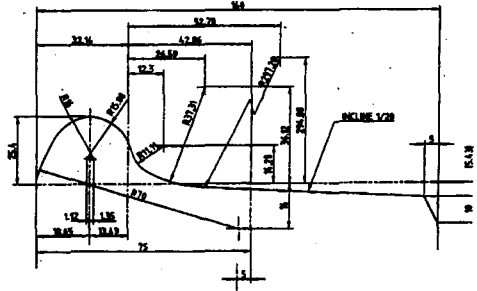
축상스프링 개선안

구 분	기 존	개 선
축상 구조 개선		
특성치	전후, 좌우, 상하 : 15.0, 15.0, 0.54 MN/m	전후, 좌우, 상하 : 4.9, 2.4, 0.54 MN/m

또한, 차륜담면은 원추형 담면형상의 문제점을 해결하기 위한 대안으로 국내외에서 사용중인 1/20 원호형 heumann담면형상을 적용하였다. 이 담면형상은 직선주행안전성과 곡선주행성능을 동시에 충족시키기 위한 방안으로 제시된 형상으로 차륜·레일 접촉시 접촉면적을 증가시킴으로서 접촉응력을 감소시켜 차륜플랜지 마모를 저감시키는 장점이 있다. 그림 6은 원추형 1/40 차륜담면형상과 원호형 1/20 heumann담면형상을 나타낸다.



(a) 원추형 1/40 차륜형상



(b) 원호형 1/20 차륜형상

그림 6. 차륜단면형상 비교

2경우의 개선안 적용시 개선차량의 곡선주행성능을 해석하였다. 해석결과 개선차량의 차륜횡압은 기존차량에 비하여 평균 35% 정도 저감될 것으로 예상되며, 이에 따른 차륜 마모지수 또한 기존차량에 비하여 평균 50% 이상, 곡선반경에 따라선 최대 75% 정도까지 작게 나타나 차량개선으로 인한 곡선주행성능이 우수할 것으로 예측되었다.

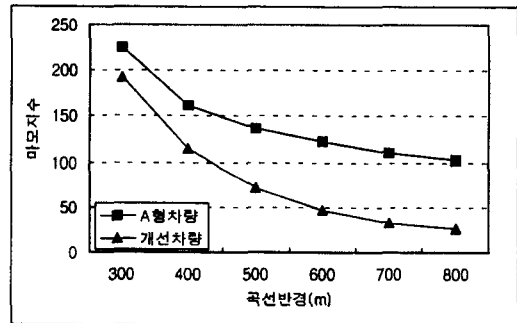
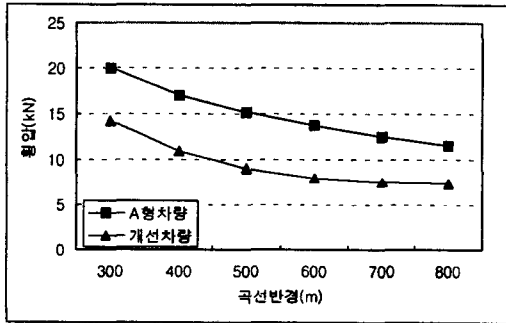


그림 7. 개선차량의 곡선주행성능 해석

5. 개선차량 성능시험

기존차량에 대한 개선차량의 성능개선을 위하여 다음과 같은 시험을 수행하였다. 시험 항목은 차량의 동적성능을 평가하기 위하여 차량 주요부의 진동가속도를 측정하였으며, 좌석에서의 승차감을 측정하였다. 곡선주행성능 개선을 검증하기 위하여 기존차량에 대한 개선차량의 차륜마모 비교시험을 수행하였다. 시험차량은 기존차와 개선차 각 1량으로 하여 각 시험항목에 대하여 비교 평가하였다.

5.1 진동가속도 시험

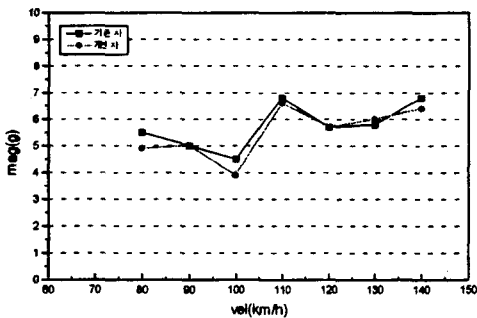
개선차량의 진동수준을 파악하고자 진동가속도 시험을 수행하였다. 시험구간은 경부선 표준선 구간(삼랑진~사상간)에서 실시하였고, 시험조건은 80km/h에서 140km/h까지 10km/h 단위로 주행속도를 변화시키면서 시험을 수행하였다. 진동가속도계 측정위치는 축상 좌우, 대차 좌우, 차체 좌우, 차체 상하로 하였고 시험데이터 분석은 한국철도기술연구원에서 적용중인 진동가속도 평가기준에 의하였다.

분석결과, 도표3 및 그림 8은 진동가속도 측정부위에 대하여 속도대역별로 분석한 진동가속도 평균값을 정리한 표와 선도이다. 개선차의 진동성능은 각 측정부위에서 기존차와 동등한 수준을 보임을 알 수 있다. 차상에서의 진동수준은 좌우방향이 양호, 상하방향이 보통 수준의 진동특성을 보여 축상개조에 따른 진동수준 저하현상은 발생하지 않았으며, 최고속도 주행시에도 기존차량에 비하여 동등한 진동수준을 보이고 있다.

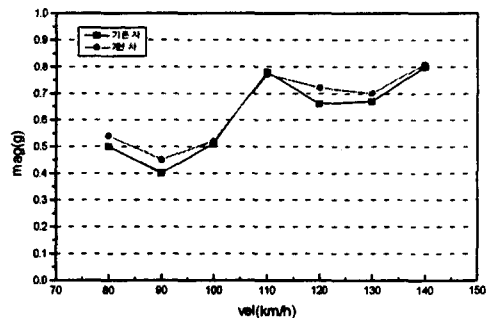
도표 3. 기존차와 개선차의 진동가속도

(단위:g)

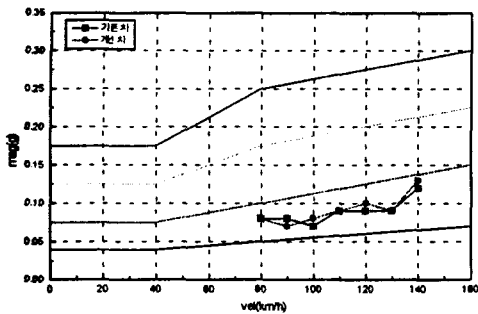
속도 (km/h)	축상좌우		대차좌우		차체좌우		차체상하	
	기존차	개선차	기존차	개선차	기존차	개선차	기존차	개선차
80	5.5	4.9	0.5	0.54	0.08	0.08	0.14	0.15
90	5.0	5.0	0.4	0.45	0.06	0.07	0.13	0.12
100	4.5	3.9	0.51	0.52	0.06	0.09	0.22	0.23
110	6.8	6.6	0.78	0.77	0.09	0.09	0.18	0.2
120	5.7	5.7	0.66	0.72	0.09	0.1	0.23	0.21
130	5.82	6.05	0.67	0.7	0.09	0.09	0.25	0.24
140	6.8	6.4	0.8	0.81	0.12	0.13	0.24	0.26
Filter(Hz)	100	100	100	100	30	30	30	30



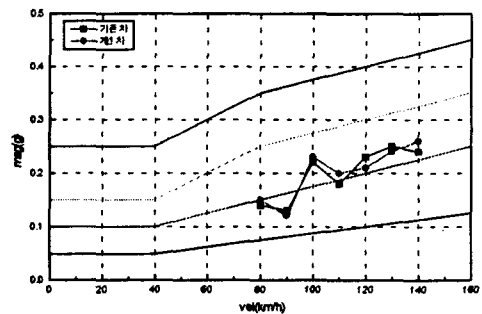
(a) 축상 진동가속도(좌우)



(b) 대차 진동가속도(좌우)



(c) 차체 진동가속도(좌우)



(d) 차체 진동가속도(상하)

그림 8. 개선차량의 진동가속도 시험결과

5.2 승차감 시험

개선차량의 좌석에서의 승차감 수준을 파악하고자 승차감시험을 수행하였다. 시험구간은 경부선으로 하였으며, 측정위치는 각 차량 진행방향 후부대차 위 좌석으로 하였다. 측정기는 ISO 승차감레벨 측정기로 하였으며, 승차감 평가기준은 철도청, 한국철도기술연구원에서 적용중인 승차감 평가기준을 적용하였다.

측정결과, 도표5에서와 같이 개선차의 승차감 수준은 기존차와 유사한 수준을 보이고 있다. 좌우방

향이 105~109dB, 상하방향이 107~110dB로 양호에서 보통사이의 승차감 수준을 보이고 있다. 따라서 개선차량의 승차감은 진동특성과 함께 기존차량에 비하여 등가 수준임이라 할 수 있다.

도표 4. 승차감 평가기준

승차감 레벨(dB)	평가 구분
103 미만	우 수
103 ~ 108	양 호
108 ~ 113	보 통
113 ~ 118	불 량
118 이상	극히 불량

도표 5. 승차감 측정결과 비교

구분	구 간	기존차(dB)	개선차(dB)	방향
1	영동~황간	109	109	좌우
2	황간~추풍령	106	105	"
3	추풍령~신암	107	107	"
4	신암~직지사	106	107	"
5	직지사~김천	107	107	"
6	연화~신동	107	108	상하
7	신동~지천	108	107	"
8	대구~동대구	109	110	"
9	동대구~삼성	107	107	"
10	삼성~유천	108	108	"

5.3 차륜마모 비교시험

곡선주행성능의 직접적인 현상으로 나타나는 차륜마모도 저감효과를 파악하기 위하여 차륜마모 비교시험을 수행하였다. 운용선로는 중앙선 청량리~안동구간으로 하였으며 기존차량과 개선차량 각 1량을 동일편성하여 동일조건으로 운행하였다. 시험운용일은 실운용일 기준 3개월로 하였다. 측정기는 Denmark Greenwood Eng.의 MINIPROF Wheel/Rail Profile 측정치를 사용하였고, 측정량은 차륜단면형상 변화와 플랜지두께를 측정하였다.

분석결과 도표6과 같이 차륜플랜지 마모량은 시험기간이 실운용 3개월에도 불구하고 기존차의 플랜지마모 평균은 1.22mm임을 보여 시험구간 선형특성의 취약함과 기존차량의 곡선주행성능 저하를 재차 보여주는 결과라 할 수 있다. 이에 비하여 개선차량의 플랜지마모는 평균 0.13mm로 기존차량의 10.7%수준으로 기존차량에 비하여 현저한 마모저감 효과를 보이고 있다. 이는 차륜마모 저감을 단언하기엔 다소 이른 감이 있으나 짧은 시험기간에도 불구하고 전절에서 해석한 바 이상의 차륜마모 저감을 보이고 있어, 본 연구에서 적용한 개선안의 효과가 적합하다고 할 수 있다.

도표 6. 차륜마모 비교시험 결과(단위:mm)

Wheel	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	평균
기존차	1.33	0.85	1.37	0.99	0.94	1.45	1.5	1.43	1.22
개선차	0.14	0.18	0.1	0.15	0.1	0.08	0.13	0.15	0.13

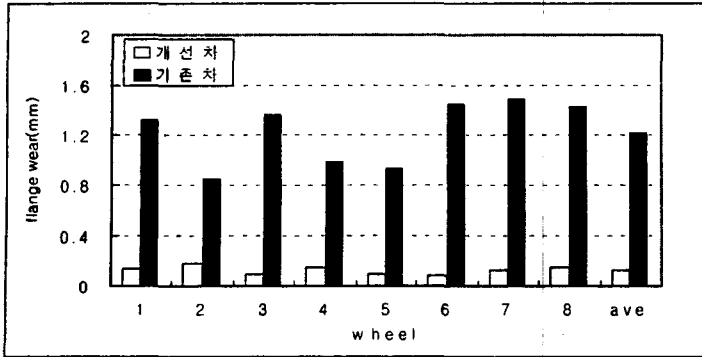
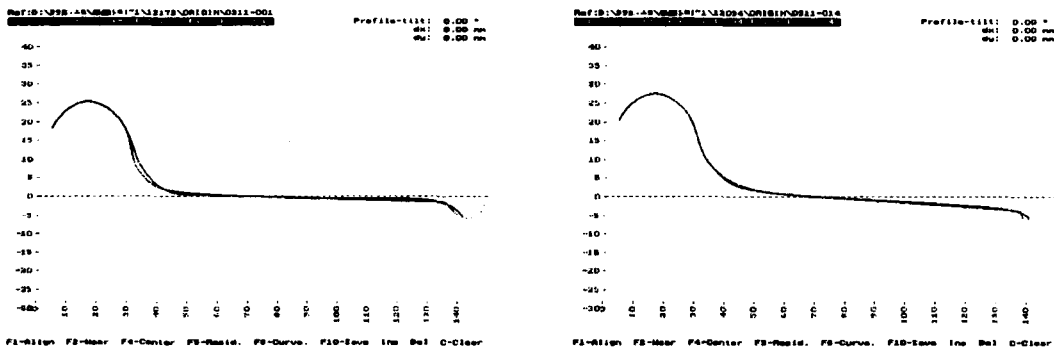


그림 9. 개선차량의 차륜 플랜지마모



(a) 기존차량의 차륜마모 예

(b) 개선차량의 차륜마모 예

그림 10. 기존차량과 개선차량의 차륜마모 예

6. 결론

곡선주행성능 저하로 인한 차량 운용상의 문제점을 안고 있는 철도차량에 대한 곡선주행성능 개선 연구를 수행하였다. 개선안으로 대차 1차현가계 구조개선, 차륜담면 형상 변경안이 적용되었으며, 이에 대한 결과는 다음과 같다.

개선차량의 동적성능을 나타내는 진동가속도와 승차감 수준은 기존차량과 동등한 수준을 보이고 있다. 또한, 개선차량의 차륜마모는 기존차량의 11% 수준으로 현저하게 감소되어 곡선주행성능이 크게 개선되었음을 보이고 있다.

따라서, 본 연구에서 대상으로 한 A형차량은 곡선주행성능 개선으로 인한 차륜수명 연장, 대차구성품 손상 예방 등의 효과가 예상되어 차량운용상 겪고 있는 여러 문제점 해결에 기여할 것으로 기대된다. 또한, 본 연구결과는 향후 차량개발시 국내 선로특성에 적합한 차량모델 예측, 유지보수 측면에서의 문제점 검토 등에 적절히 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Vijay K. GArg, and Rao V. Dukkipati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press, 1984
2. "신형 무궁화객차 대차 문제점 파악 및 개선방안에 관한 연구", 철도청, 1996
3. "NT21대차 운행성능향상 연구", 한국철도기술연구원, 1998
4. "일본기계학회편, 철도차량의 동역학", 전기차연구회(주), 1996
5. K.W.Pennington, and N.A.Harward, "A Steering Bogie for the British Rail Class 37 Locomotive", IMechE, 1986