

무궁화객차의 곡선주행성능 연구

A Study on Running Performances of Mugungwha Coach in Curves

허현무*
Hur, Hyun-Moo

이찬우**
Lee, Chan-Woo

ABSTRACT

In this study, we have analyzed the running performance of Mugungwha coach in curves to grasp the problems relating to this coach's curving performance and present improvement plans. Simulations and tests to analyze curving performances are carried out, and through this process we could prepare a plan to improve the running performance in operation.

1. 서론

철도차량의 주행성능은 직선선로에서의 고속주행성능과 곡선선로에서의 곡선선회성능으로 나뉠 수 있다. 일반적으로 고속주행성능과 곡선주행성능은 서로 상충되는 특성을 보이고 있으나, 최근 이러한 상충되는 문제를 해결할 수 있는 기술적 대안의 발달로 곡선주행성능이 향상된 고속차량이 실용화되고 있다.

한편, 곡선선로가 많은 부분을 차지하고 있는 국내 기존선로에서는 차량의 운행시간에 민감하게 영향을 미치는 인자는 차량의 최고속도보다 곡선주행속도라 할 수 있다. 곡선주행성능은 선형특성, 차량의 횡방향 현가계에 좌우되며, 차륜마모, 대차구성품의 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 운용중인 철도차량의 일부는 설계초기부터 국내 선형특성에 부합되게 설계되었다고는 보기 힘들며, 이중 국내 여객차량의 주종을 이루는 무궁화객차는 이와 관련된 문제를 포함하고 있다고 할 수 있다. 따라서 본 연구는 무궁화객차의 곡선주행특성을 분석함으로써 차량의 운용성과 유지보수측면에서 효율적인 방안을 모색하고자 수행되었으며, 여기에 그 결과의 일부를 소개한다.

2. 곡선주행성능 해석

무궁화객차에 적용되고 있는 대차는 두 종류가 있다. 하나는 1차, 2차 현가계가 코일스프링으로 구성된 볼스타 대차(이하 A형)와 최근 개발된 축상 고무스프링형식의 1차현가계, 공기스프링인 2차현가계로 구성된 볼스타리스 대차(이하 B형)이다. A형 대차 적용차량은 1991년 여객서비스 개선을 목적으로 차체가 2.5m 장대화 되었으며, 차량중량도 공차시 2.2ton 증가되었다. 이로 인해 대차간 거리가 증가되었고 이는 차량의 곡선선회성능을 저하하게 하는 영향으로 작용하여 차륜의

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원

** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원

플랜지 과대마모, 대차 구성품의 편마모 현상등이 심화되었다. 이와 같이 장대화된 A형 대차 적용 차량의 곡선주행성능을 파악하고 그 문제점을 분석하고자 다음과 같이 차종별 곡선주행해석을 수행하여 비교하였다. 도표 1은 무궁화객차의 주요 제원 및 물성치를 나타낸다.

도표 1. 무궁화객차 적용 대차별 주요 물성치

구분	특 성 치	단 위	대차 종류		
			A형(구형)	A형	B형
차체	길이	m	21.0	23.5	←
	질량	ton	25.2	26.6	27.89
대차 Frame	질량	ton	2.05	←	2.12
	레일면에서의 무게중심 높이	m	0.72	←	0.57
윤축	질량	ton	1.775	←	1.78
	차륜반경	m	0.43	←	←
주요 치수	대차중심간 거리의 반	m	7.1	7.95	←
	축간거리	m	2.1	←	2.3
	1차스프링 횡간격의 반	m	0.965	←	←
	2차스프링 횡간격의 반	m	1.24	←	1.0
1차스프링	전후방향 강성	MN/m	-	-	12.0
	횡방향 강성	"	-	-	4.90
	수직방향 강성	"	0.479	0.544	1.02
2차스프링	전후방향 강성	MN/m	0.389	←	0.16
	횡방향 강성	"	0.389	←	0.16
	수직방향 강성	"	0.557	←	0.30
댐퍼	1차 수직댐퍼	MNs/m	-	←	0.037
	2차 수직댐퍼	"	0.078	←	0.020
	2차 수평댐퍼	"	0.029	←	0.039
대차형식			볼스타	←	볼스타리스
차륜형상			1/40	←	1/20

2.1 차량 모델링

곡선주행성능 분석을 위한 동특성해석은 AEA사의 철도차량 전용 프로그램인 VAMPIRE를 사용하였다. 전체 차량을 모델링하기 위해 11개의 질량요소가 이용되었다. A형 대차의 1차, 2차현가계는 모두 코일스프링으로 구성되어 있다. 1차스프링은 16개의 BUSH요소로 모델링 하였으며, 2차스프링은 8개의 SHEAR요소로 모델링 하였다. 1차현가계의 댐퍼는 없으며, 2차현가계는 4개의 수직댐퍼와 4개의 좌우방향 횡댐퍼가 취부되어 있다. 이들 댐퍼는 8개의 DAMPING요소로 모델링 하였다. 또한, 상·하볼스타간에 좌우롤링을 구속하기 위한 간극은 운동제한요소인 BUMPSTOP요소를 이용하여 모델링하였다.

대차와 차체간 연결은 2개의 BUSH요소를 사용하였고, 대차와 상볼스타간의 견인력을 전달하는 볼스타 앵커는 4개의 STIFFNESS요소를 이용하였다. 또한 대차와 차체간의 요잉에 의한 회전저항을 감소시키기 위한 마모판은 FRICTION요소를 이용하였고, 대차와 하볼스타를 연결하는 링크는 8개의 PINLINK요소로 모델링하였다.

2.2 해석결과

구형 A형대차에 비해 신형 A형대차는 차체가 2.1m 장대화 되었으며 공차상태시 2.2ton의 무게가 증가되었다. 이로 인한 차량의 주행안정성을 고유치해석을 통해 분석한 결과, 유효답면계수 0.4에서 신형 A형이 155km/h, 구형이 151km/h에서 임계속도가 발생하고 있다. 따라서 차량의 안정성측면에선 장대화된 신형 A형이 구형에 비해 다소 안정되었다고 할 수 있다. 그러나 그 차이는 미미하여 차량의 장대화로 인한 안정성에 대한 영향은 크지 않음은 알 수 있다.

그림 1~2는 구형대비 신형 A형 무궁화객차의 곡선주행시 나타나는 횡압과 마모분석을 위하여 steady-state해석을 수행한 결과이다. 해석은 차량 고유의 횡압과 마모특성을 파악하기 위해 R300에서 R800까지의 궤도틀림이 없는 이상적인 곡선에서 수행하였다. 횡압은 R300에서 신형 A형이 20.3kN, 구형이 19.1kN, B형이 17.6kN이며, R800에서 신형 A형이 12.8kN, 구형이 12.1kN, B형이 8.9kN으로 신형 A형이 구형에 비해 평균 6%정도 크게 나타났으며, B형에 비해선 약 13~30% 크게 나타났다.

곡선통과시 횡압에 의한 차륜의 마모를 본 해석프로그램에서 정량화한 차륜과 레일사이의 접촉면에서의 단위 회전거리당 행해진 일(N)인 마모지수로 표현했다. 플랜지마모지수는 R300에서 신형A형이 150, 구형이 141이며, R800에선 신형 A형이 87, 구형이 83으로 신형 A형이 구형에 비해 평균 6%정도 크게 나타났다. 또한 전위차륜에 대한 총마모지수는 R300에서 신형 A형이 268, 구형이 251, B형이 260이며, R800에선 신형 A형이 87, 구형이 83, B형이 72로 신형 A형이 구형에 비해 평균 6%정도 크게 나타났고 B형에 비하여 약 3~46% 크게 나타났다.

이는 신형 A형이 차체의 장대화와 중량증가에 기인한 것으로 구형에 비해 안정성측면에선 미미하나 약간의 임계속도 향상을 초래한 반면, 이와 상충되는 곡선추종성능에선 취약함을 심화시켰다고 할 수 있다. 또한 A형 대차의 단점을 보완하여 개발된 B형 대차는 세브론 1차현가와 공기 스프링 2차현가요소로 구성되어 있어, 본 해석의 결과와 마찬가지로 곡선주행시 유연하게 적용할 수 있는 구조임을 보여준다. 따라서 A형 대차의 1차현가계의 물성치나 구조변경없이 차체의 장대화를 기한 신형 A형대차 적용차량의 곡선주행성능은 구형에 비하여 취약해졌음을 알 수 있다.

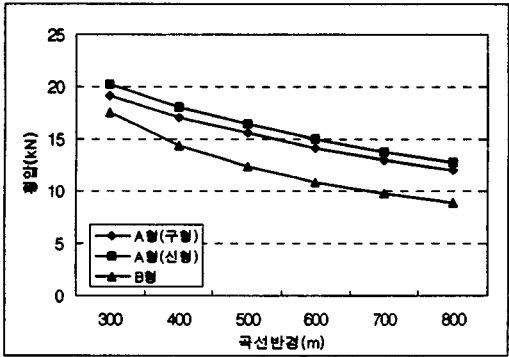


그림 1. 무궁화객차의 횡압

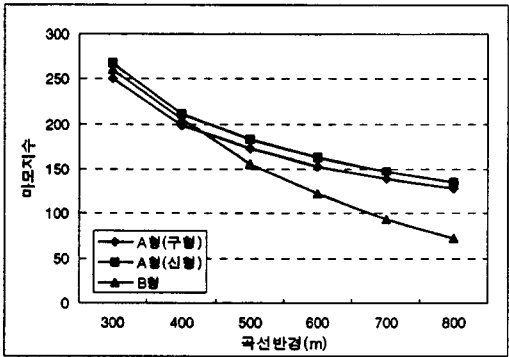


그림 2. 무궁화객차의 마모지수

3. 운용선로별 차륜마모특성

철도차량의 곡선주행성능과 관련된 현상으로 나타나는 차륜의 마모는 차량의 횡방향 현가계특성과 그 차량이 운용되는 선형특성과 관계가 깊다. 따라서, 차륜마모측면에서 A형 대차 적용 무궁화객차의 운용선로와의 상관관계 파악 및 차종별 곡선주행성능 해석결과를 확인함으로써, 곡선주행성능측면에서 운용상의 개선안을 도출하고자 운용선로별 차륜마모 해석 및 비교시험을 수행하였다.

3.1 차륜마모해석

마모측면에서 A형 대차 적용 무궁화객차의 국내 운용선로에 대한 적용성을 분석하기 위해 운용선로별 차륜마모 민감도해석을 수행하였다. 본 해석은 운용선로에 대한 차량의 마모민감도를 분석하기 위한 것으로 차량의 곡선별 마모특성, 운용선로의 선형 및 곡선의 구성비율을 입력으로 하며 각 선로에 대한 대표값인 마모지수(weighted wear index)를 산출한다. 해석은 steady-state해석과 마모예측루틴을 이용하였다.

도표 2. 무궁화객차의 운용선로별 마모지수해석(A형대차)

Radius	Wear No.			Wear Index	경부선	
	Tread(L)	Tread(R)	Flange		Wt.(%)	w.w.i.
300	15	103	150	1.340	0.00	0.0000
400	24	74	113	1.055	1.76	0.0186
500	25	56	101	0.910	3.97	0.0361
600	24	43	96	0.815	19.00	0.1549
700	22	33	91	0.730	1.01	0.0074
800	20	27	87	0.670	5.39	0.0361
sum.					31.14	0.2531

(계속)

Radius	호남선		중앙선		경전선		전라선	
	Wt.(%)	w.w.i.	Wt.(%)	w.w.i.	Wt.(%)	w.w.i.	Wt.(%)	w.w.i.
300	0.00	0.0000	0.00	0.0000	6.72	0.0900	4.54	0.0608
400	2.72	0.0287	24.98	0.2635	15.36	0.1621	9.37	0.0989
500	2.29	0.0208	5.07	0.0461	1.65	0.0150	2.92	0.0265
600	9.50	0.0774	6.70	0.0546	3.99	0.0325	9.59	0.0782
700	0.64	0.0046	0.64	0.0047	1.00	0.0073	0.97	0.0071
800	7.76	0.0520	2.34	0.0157	2.36	0.0158	4.25	0.0284
sum.	22.89	0.1835	39.74	0.3847	31.08	0.3227	31.64	0.2999

도표 2 및 그림 3은 해석결과를 정리한 결과이다. 곡선별 진행방향의 전위축에 대한 마모지수 및 wear index를 구하고, 여기에 운용선로의 곡선비율을 곱하여 모든 곡선에 대해 총합을 구하여, 각 운용선로에 대한 마모지수(weighted wear index)를 구하였다. 운용선로는 무궁화객차의 주요 운용선로구간을 적용하였다.

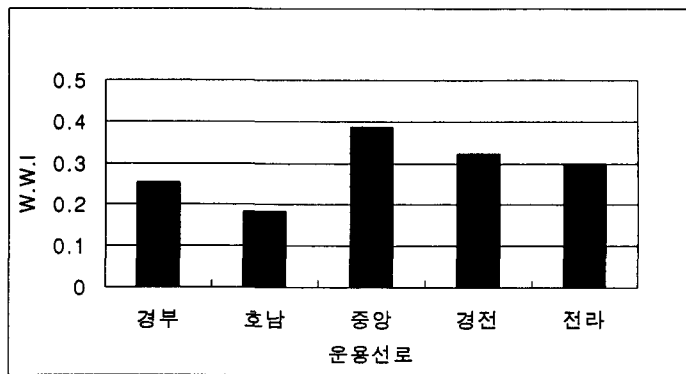


그림 3. 운용선로별 마모민감도 비교

해석결과, 무궁화객차의 국내 선로별 마모민감도는 호남←경부←전라←경전←중앙 순으로 호남선에서 가장 우수하고 중앙선에서 가장 취약하다. 마모민감도는 선형의 곡선비율에 직접적으로 관련되는 데, R400미만이 각각 전체구간의 2.72%, 1.76%인 호남, 경부선과 같은 비교적 직선선에선 민감도가 둔하지만 R400미만이 각각 전체구간의 24.98%, 22.08%, 13.91%인 비교적 곡선선로라 할 수 있는 중앙, 경전, 전라선에선 그 영향이 크게 나타나기 때문이다.

3.2 차륜마모 비교시험

차륜마모는 상기한 바와 같이, 선형특성, 차량현가계, 차륜 및 레일의 재질, 환경, 운용조건등 매우 여러 인자에 의한 복잡한 현상이라 할 수 있다. 따라서, 이렇게 복잡한 차륜마모특성을 파악하기 위해선 동일조건으로 실제 운용하면서 차륜의 마모도를 추적하는 것이 가장 적합한 방법이라 할 수 있다.

차종별 마모특성 분석을 위해 총 12량을 시험차량으로 선정하였으며, 시험기간은 원형정비되어 운행개시일로부터 8개월로 하였다. 측정기는 Greenwood Eng.사의 MINIPROF wheel/rail 측정기를 사용하였다. 도표 3은 차륜마모 비교시험을 위한 시험차량 및 운용선로를 나타내며, 그림 4는 차륜마모도 측정 예를 나타낸다.

도표 3. 차륜마모 비교시험 차량 운용선로

차호	대차	주 운행선로및 운행구간		총 운행일수	소속	비고
12502	B형	경부	서울-동대구	240	서울	
11150	ASEA		서울-부산	225	"	
12035	A형	호남	서울-순천	230	"	10월 이후 서울-진주 운행
12086	A형		"	"	"	
11171	MAN	중앙	서울-광주	210	"	10월 이후 서울-진주 운행
12501	B형		청량리-안동	240	"	
12503	B형		"	"	"	
11173	MAN		"	200	"	10월 이후 서울-강릉 운행
11152	ASEA		"	"	"	
12089	A형		"	220	"	
12156	A형		"	"	"	
12504	B형		경전	목포-부산	240	순천

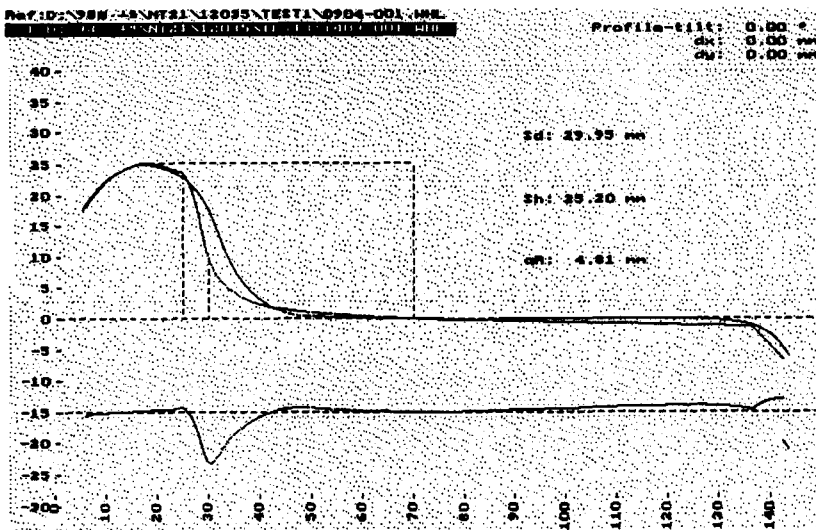


그림 4. 차륜플랜지 마모형상 측정예

차륜마모특성 비교분석을 위해 운용선로 및 차종별로 분류하여 그 특성을 분석하였다. 도표 4는 본 차륜마모비교시험에서 운용중인 시험차량 12량에 대한 차륜플랜지마모를 정리한 것으로 각 차호별로 8개의 차륜의 플랜지마모를 평균한 값이다.

도표 4. 시험차량의 플랜지마모

차호	12035	12086	12089	12156	12501	12502	12503	12504	11150	11152	11171	11173
마모량 (mm)	3.87	3.80	3.84	3.67	1.06	2.04	1.17	2.92	3.56	2.33	3.79	2.10

(1) 곡선구간 운용차량 차륜마모특성

그림 5는 무궁화객차의 곡선주행성능 분석을 위하여 국내 주요 간선중 곡선이 상대적으로 많은 중앙선(청량리~안동)구간에서 실시된 차륜마모비교시험 결과를 나타낸 선도이다. 시험조건은 동일 노선을 정기검수나 차량고장으로 인한 운행일 제한시한을 제외하고 동일 노선에서 1일 1왕복하는 조건으로 수행되었다.

그림 5에서와 같이 무궁화객차의 차륜플랜지마모는 A형이 3.755 mm, B형이 1.115mm이며, 새마을객차인 ASEA대차 적용차량은 2.33mm, MAN대차 차량은 2.10mm로서 각 차종의 운행거리 및 운행일수를 고려하지 않은 상태에서도 A형 무궁화객차가 가장 큰 값을 알 수 있다. 이 결과는 각 차종별 운행일수가 다소 상이하더라도 운용선로가 동일하므로 비교적 차종별 차륜마모특성이 잘 반영된 결과라고 판단된다. 도표 5는 차종별 마모특성비교를 위해 A형대차의 운행거리 및 운행일수를 보정하여 마모량을 비교한 표이다.

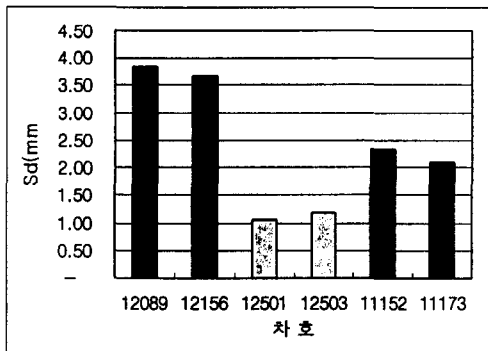


그림 5. 곡선구간 운용차량의 플랜지마모

도표 5. 곡선구간 운용차량의 플랜지마모 비교

차종	마모량 (mm)	단위키로당 마모량 ($\times e-5$ mm/km)	A형대차기준 마모수준(%)	비고
A형	3.755	3.25	-	12089,12156
B형	1.115	0.82	25	12501,12503

여기서 A형대차의 플랜지마모가 가장 크게 나타나는 것은 A형대차의 곡선추종성을 좌우하는 1차/2차 현가계가 모두 코일스프링으로 되어 있어 곡선통과시 발생하는 횡압과 차량편기량에 대한 흡수능력이 타 대차에 비해 현저히 낮기 때문이다. 이에 대한 반증으로 A형대차 적용차량의 대차중심간 거리는 비교대상 차종과 동일하고, 단지 1/2차 현가장치가 고무스프링으로 되어 있는 B형대차 적용차량은 A형대차의 차륜마모에 비해 약 25%정도의 플랜지마모수준을 보이고 있다.

또한, 새마을객차인 ASEA대차 차량은 1차현가장치가 고무스프링이고 2차현가장치가 코일스프링이다. 이에 비해 MAN대차 적용차량은 1차현가장치가 코일스프링이고 2차현가장치가 공기스프링 타입의 고무스프링이다. 이들 새마을객차의 플랜지마모도 B형대차 차량에 비해서는 크지만, A형대차 적용차량에 비해선 약 60%정도의 플랜지마모수준을 보이고 있다.

따라서, A형대차 적용차량은 곡선추종성 측면에서 가장 취약한 현가계로 구성되었음을 알 수 있으며, 조향성능을 좌우하는 횡방향 지지력이 구조적으로 매우 커서 차량운행시 플랜지 직립마모

로 인한 차량안전운행에 문제유발 원인이 되고, 차륜원형 재생시 삭정량증가로 인한 차륜수명이 타 대차 적용차량에 비해 현저하게 저하될 것으로 예측된다.

(2) 직선구간 운용차량 차륜마모특성

그림 6은 무궁화객차의 직선구간 마모특성분석을 위하여 국내 주요 간선중 곡선이 상대적으로 적은 경부선(서울~동대구, 서울~부산), 호남선(서울~광주), 전라선(서울~순천) 구간에서 실시된 차륜마모비교시험 결과를 나타낸 선도이다.

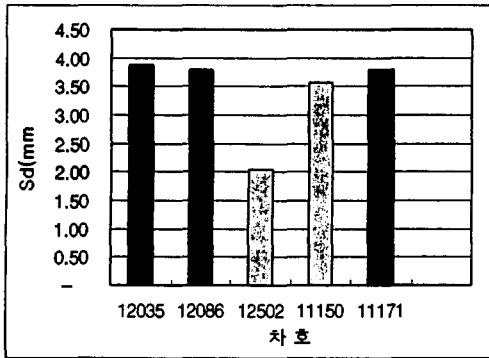


도표 6. 직선구간 운용차량의 플랜지마모 비교

차종	마모량 (mm)	단위키로당 마모량 ($\times e-5$ mm/km)	NT21대차기준 마모수준(%)	비고
A형	3.835	2.15	-	12035,12086
B형	2.04	1.30	53	12502

그림 6. 직선구간 운용차량의 플랜지마모

그림 6에서 보는 바와 같이 A형대차 적용차량의 차륜플랜지마모는 3.835mm, B형대차 적용차량 플랜지마모는 2.04mm, 새마을객차인 ASEA대차 적용차량은 3.56mm, MAN대차 적용차량은 3.79mm였다. 이 결과는 각 차종별 운행일수가 다소 상이하고 그 운용선로도 상이하므로 그 결과를 직접적으로 비교하기엔 무리가 있다고 판단되며 이를 시험차량의 운행거리 및 운행일수를 보정하여 도표 6과 같이 마모량을 비교하였다.

직선부를 주행하는 A형대차 적용차량 대비 B형대차 적용차량은 약 53%정도의 플랜지마모수준을 보이고 있으며, ASEA대차 및 MAN대차 적용차량은 A형대차와 거의 같거나 미소하게 작은 마모수준을 보이고 있다.

(3) 차종별 차륜마모특성

A형 대차 적용 차량에 플랜지마모를 상대 비교해보면, 우선 곡선부가 많은 중앙선 운용차량 2량에 대한 평균 플랜지마모는 3.755mm이고 상대적으로 직선부가 많은 전라선 운용차량 2량에 대한 평균 플랜지마모는 3.835mm이다. 운용거리를 고려하지 않고 마모량 자체만 비교한다면 4차량 모두 동등한 수준의 마모를 보이고 있다. 그러나 이들 차량을 상대 비교하기 위해서는 각 차호별 주행거리 및 운행일수가 다르므로 시험기간에서 차량운행일수 및 운행거리를 보정해야 한다. 도표 7은 중앙선 운용차량을 기준으로 차륜마모를 재산정한 표이다.

도표 7. 운용선로별 A형 무궁화객차의 플랜지마모 비교

운행선로	마모량(mm)	단위키로당 마모량 ($\times e-5$ mm/km)	중앙선기준 마모수준(%)	비고
중앙선	3.755	3.25	-	12089,12156
전라선	3.835	2.4	73	12035,12086

따라서 NT21대차 적용차량에 대한 플랜지마모특성을 비교하면 곡선부가 상대적으로 많은 중앙

선에서 운용하는 차량보다 직선부가 상대적으로 많은 전라선 운용차량의 플랜지마모가 약 27% 정도 작음을 알 수 있다. 즉, 같은 마모량이라도 총주행거리를 감안하면 직선선로 운용차량이 운용속도가 상대적으로 높음에도 불구하고 단위거리당 마모측면에서는 더욱 효율적임을 알 수 있다.

4. 결론

상기한 바와 같이 국내 여객차량의 주종을 이루고 있는 무궁화객차의 곡선주행특성에 대하여 해석과 시험을 통하여 분석하였다. A형대차 적용차량은 현가계 특성상 곡선추종성능이 타대차 적용차량보다 취약함을 보였고, 이는 직선구간보다 곡선구간에 더욱 민감함을 확인할 수 있었다. 최근 이러한 문제점을 개선할 목적으로 개발된 B형대차 적용차량은 곡선 및 직선구간에서 우수한 차륜마모저감 효과를 보여 유지보수측면에서 우수함을 보임을 알 수 있었고, 따라서 곡선주행성능과 관련된 차륜마모저감 측면에서 보면 A형대차 적용 차량을 비교적 직선선로라 할 수 있는 경우, 호남선에 투입하는 것이 차량의 유지보수측면에서 효율적일 것으로 예측된다.

따라서, 본 연구는 차량 개발시 차량의 주행성능 및 유지보수측면에서 예측되는 문제점 및 효과를 사전에 검토함으로써 차량 운용시 나타날 수 있는 문제점들을 미연에 방지할 수 있는 충분한 가능성을 보여준 결과라 사료되며, 향후 차량개발이나 운용선로 변경시 적절히 활용되리라 기대된다.

참고문헌

1. Vijay K. GArg, and Rao V. Dukkipati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press, 1984
2. "Vampire User Manual", BR Research, 1997
3. "선로제표", 철도청, 1997
4. "신형 무궁화객차 대차 문제점 파악 및 개선방안에 관한 연구", 철도청, 1996
5. "일본기계학회편, 철도차량의 *グイナミクス*", 전기차연구회(주), 1996
6. K.W.Pennington, and N.A.Harward, "A Steering Bogie for the British Rail Class 37 Locomotive", IMechE, 1986