

철도차량 사행동에 미치는 인자에 관한 연구

A Study on the Parameters for Hunting of the Rolling-stock

허현무* 유원희**
Hur, Hyun Moo You, Won Hee

ABSTRACT

The hunting is the natural characteristics of the railway wheelset which is originated from the contact between the conical type wheel profile and rail. The critical speed of rolling-stock is called when the hunting is occurred, and it is closely connected with vehicle stability. The parameters which influence the hunting motion are like wheel profile, primary spring property and wheelset dimension, etc. The studies for these parameters are reported diversely. In this study, we aim to analyze the influence of parameters on hunting with the change of wheel profile produced by wheel wear and material property produce by aging of primary spring. For this, we made a dynamic model for wheelset and vehicle. Using these models, we analyzed the critical speed with the variations of the parameters like as wheel profile and primary spring property and we show the results.

1. 서론

철도차량의 사행동은 원추형 차륜담면형상과 레일간 접촉 현상에 의하여 발생하는 윤축의 고유한 특성이라 할 수 있다. 사행동이 발생하는 속도를 임계속도라 하며 차량의 안정성과 관련된다. 이러한 사행동에 영향을 미치는 인자는 차륜의 담면형상, 1차현가요소 특성, 윤축의 치수등 여러 요인들을 들 수 있다. 이러한 인자들에 대한 영향 해석은 여러 형태의 연구를 통하여 보고되고 있다.

본 연구에서는 차량의 안전성 확보를 위하여 유지보수 관점에서 차륜의 마모로 인한 담면형상 변화, 1차 현가요소인 축상스프링 물성 저하에 의한 사행동 영향을 분석하고자 한다. 이를 위하여 윤축의 거동에 대한 비선형 동역학 모델과 차량 모델을 수립하였다. 이를 이용하여 축상스프링 특성치, 차륜담면형상 변화에 대한 차량 임계속도 해석 연구를 수행하였으며, 본 논문에서는 이에 대한 연구 결과를 소개한다.

2. 사행동

2.1 사행동 메커니즘

사행동은 철도차량의 고유한 운동으로서 윤축의 좌우 직선운동과 연직축 주위의 회전운동이 연성된 것이기 때문에 레일횡곡과장이 윤축의 사행동과장과 일치하면 공진되어 큰 진폭이 된다. 후자는 1개의 차축에 고정된 원추담면을 가지는 한 쌍의 차륜이 평행한 레일 위를 전주할 경우 필연적으로 발생하는

* 허현무, 회원, 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부

E-mail : hmhur@krri.re.kr

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

** 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부

운동으로써 역학적으로 불안정한 일종의 자려운동에 해당된다. 따라서 어떤 일정 속도 이상이 되면 사행동은 대단히 심해지며 차체가 크게 좌우로 동요하게 된다. 고속에 있어서 객차나 전동차의 승차감에 나쁜 영향을 주는 것에는 차축 또는 대차의 사행동으로 차체의 횡동요를 들 수 있다. 또 기관차와 같이 무거운 차량이 심한 사행동을 일으키면 그 에너지가 크기 때문에 레일 파손이 일어나 중대사고가 유발된다.

사행동에 관련된 특성을 이해하기 위하여 1개의 윤축이 평행한 레일 위를 전주할 경우를 가정하여 윤축의 운동방정식을 유도하면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} m\ddot{y} + \frac{f_2}{v} \dot{y} - f_2\phi &= 0 \\ m\ddot{\phi} + \frac{f_1 a^2}{v} \dot{\phi} + \frac{f_1 a \lambda}{r} y &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, y : 윤축 횡방향 변위, ϕ : 윤축 yaw 변위, m : 윤축의 질량, i : 관성모우멘트반경
 λ : 답면구배, a : 차륜접촉점거리의 반, v : 주행속도, r : 차륜 반경, f_1, f_2 : 크립계수

윤축의 운동은 그림 1과 같이 정현운동으로 가정하였을 때 사행동의 파장은 $S_1 = 2\pi\sqrt{ar/\lambda}$ 로 나타낼 수 있다. 이 파장은 y 및 ϕ 의 사이에서 기하학적 관계에서 유도할 수 있지 때문에 기하학적 사행동파장이라고 한다. 원통답면의 경우는 $\lambda=0$ 이기 때문에 파장이 무한대가 되며, 사행동을 하지 않지만 동시에 복원성도 없게 된다. 속도가 높게 되면 관성력이 크게 되며 따라서 답면구배를 생략할 수 없다. 원추답면의 차륜을 가진 윤축 또는 대차의 사행동은 불안정한 운동이기 때문에 이를 예방하고 운동을 안정하게 하기 위하여 다음과 같은 방법이 고려된다. $\lambda=0$, 즉 원통답면의 차륜을 쓰는 것은 이상적인 사행동의 방지법이라 할 수 있으나, 장기간 답면을 정상의 형상으로 유지함이 어렵고, 또 곡선통과시 횡압이나 플랜지마모 등의 관점에서 문제가 있기 때문에 관성력에 반대되는 탄성복원력을 줌에 따라 운동을 안정하게 하는 방법이 고려되고 있다.

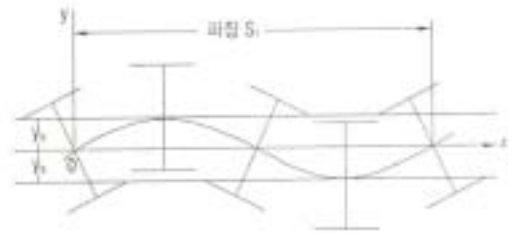


그림 1 사행동시 윤축의 거동

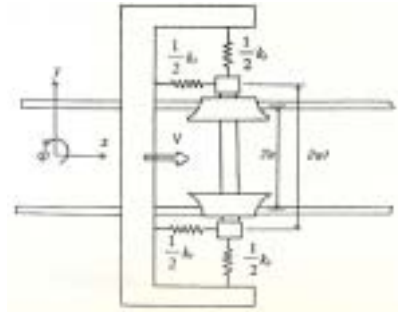


그림 2 윤축 모델

그림 2에 나타난 것 같이 윤축이 전후방향으로 k_1 , 좌우 방향으로 k_2 의 스프링으로 지지 되어있는 경우를 생각하면 운동방정식은

$$\begin{aligned} m\ddot{y} + \frac{f_2}{v} \dot{y} + k_2 y - f_2\phi &= 0 \\ m\ddot{\phi} + \frac{f_1 a^2}{v} \dot{\phi} + k_1 a_1^2 \phi + \frac{f_1 a \lambda}{r} y &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있고 이 식을 풀면 한계진동수 f_{cr} 및 한계속도 v_{cr} 는 다음식으로 주어지게 된다.

$$\begin{aligned} f_{cr}^2 &= \frac{k_2 f_2 a_1^2 / f_1 a^2}{m(1 + f_2 i^2 / f_1 a^2)} = \frac{f_y^2 + f_\phi^2 f_2 i^2 / f_1 a^2}{1 + f_2 i^2 / f_1 a^2} \\ \left(\frac{f_{cr} S_1}{2\pi v_{cr}}\right)^2 &= 1 - \frac{(k_2 i^2 - k_1 a_1^2)^2}{f_1^2 a^4 (1 + f_2 i^2 / f_1 a^2)} \left(\frac{S_1}{2\pi}\right)^2 \approx 1 \end{aligned} \quad (3)$$

f_y, f_ϕ 는 스프링에 의한 윤축의 고유진동수로서 $f_y = \sqrt{k_2/m}$, $f_\phi = \sqrt{k_1 a_1^2 / m i^2}$ 이다. 식 3으로부터 한계 시의 사행동 파장은 기하학적인 사행동파장으로 거의 대등하며, 또 임계속도(critical speed)를 향상시키기 위해서는 f_y, f_ϕ 를 높일수록 좋아짐을 알 수 있다.

2.2 철도차량 동특성에 영향 미치는 영향 인자

철도차량 동특성에 영향을 미치는 주요 인자는 주행장치인 대차의 구성요소와 관련된 설계변수라 할 수 있다. 설계변수는 표 1과 같이 대차의 1, 2차 현가장치 특성, 차체/대차 지지장치 특성, 윤축질량, 선로조건, 그리고 운행속도 등을 들 수 있으며 이들 인자의 특성에 따라 차량의 동적 성능을 대표하는 승차감(수직방향, 횡방향), 주행안전성(사행동 임계속도, 탈선계수), 곡선주행성능(차륜마모, 횡압) 등의 성능에 영향을 미친다.

차량주행시 횡방향 안정성과 관련된 사행동에 영향을 미치는 인자는 상기 표에서와 같이 주행안전성에 강한 영향을 미치는 인자들로 1차현가계, 2차현가계, 윤축, 선로특성등을 들 수 있다. 특히 철도차량의 사행동은 윤축의 사행동에서 비롯되며 윤축 임계속도는 식 4와 같이 축상스프링 전후, 좌우방향 강성, 윤축의 질량, 관성모우멘트, 축중과 같은 인자와 좌우 차륜/레일 접촉점간의 거리, 차륜반경, 좌우차륜의 구름반경차, 좌우차륜의 접촉각차와 같은 차륜과 레일의 기하학적 접촉특성에 관련된 인자의 영향을 받는다.

특히 1차현가계 전후및 좌우강성은 축상스프링의 비선형 특성에 의한 영향과 노후에 따른 축상스프링 물성치 변화에 의한 영향이 윤축의 사행동 임계속도에 미치는 영향이 중요하다고 할 수 있다. 또한 차륜담면과 레일두부의 형상, 윤축의 차륜내면간 거리, 궤간, 차륜, 레일의 마모등은 차륜과 레일의 기하학적 접촉거동에 비선형성을 증가시켜 윤축의 임계속도및 차량의 주행안전성을 저하시키는 요인으로 작용한다. 따라서 사행동 예방, 균일한 동적성능및 주행안전성 확보를 위해서는 윤축의 임계속도에 강한 영향을 미치는 인자들에 대한 설계변수 최적화와 효율적 유지관리 기법 적용이 매우 중요하다고 판단된다.

$$V = f(K_x, K_y, r_0, \Delta r, \Delta \delta, a, m, I_x, W_a) \quad (4)$$

여기서, V : 임계속도(m/s), m : 윤축의 질량(kg), I_x : 윤축의 관성모우멘트(kgm^2)
 K_x : 축상스프링 전후 강성(N/m), K_y : 축상스프링 좌우 강성(N/m)
 a : 차륜/레일 접촉점간의 거리의 반(m), r_0 : 차륜반경(m), W_a : 축중(N)
 Δr : 좌우차륜의 구름반경차($r_L - r_R$), $\Delta \delta$: 좌우차륜의 접촉각차($\delta_L - \delta_R$)

3. 1차 현가요소에 의한 영향 분석

현가장치에 의한 사고 예방, 주행안전성 확보를 위하여 건교부 “철도차량 안전기준에 관한 규칙”에는 표 2와 같이 제 60조에 현가장치에 대한 안전기준을 명시하고 있다. 이에 의하면 현가장치는 차량 설계시 설계최고속도에 적합한 성능을 갖도록 설계되어야 한다. 그러나 차량의 노후에 따라 현가장치의 특성치 변화가 예상되며 이로 인한 차량의 안정성에 미치는 영향은 균일한 주행성능 확보 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러나 국내 실정을 살펴보면 차량 제작시 현가장치에 대한 안전기준은 제시되어 있으나 노후에 따른 현가장치 성능에 대한 신뢰성 및 유지보수 기준 등은 아직 정립되어 있지 않은 실정이다. 따라서 이에 대한 연구및 기준 도출이 시급하다고 판단되며 본 절에서는 현가장치

표 1 설계변수가 차량 성능에 미치는 영향

설계변수	동적성능	승차감		주행 안정성	곡선주행 성능	비고
		좌우	상하			
1차 스프링 상수	상하	C	B	B	C	A:강함 B:보통 C:약함
	좌우	B	C	A	B	
	전후	B	C	A	A	
2차 스프링 상수	상하	C	A	C	C	
	좌우	A	C	B	C	
	전후	C	C	A	B	
감쇠계수	상하	C	A	B	C	
	좌우	A	C	B	C	
윤축 질량		C	B	A	C	
선로 특성		B	C	A	A	
주행 속도		B	B	B	B	

표 2 철도차량 안전기준에 관한 규칙 제60조(현가장치)

제60조(현가장치)
① 현가(懸架)장치는 설계최고속도와 설계 최대하중에 적합한 성능을 가져야 하며, 운행중 절단 또는 파손시 설치된 위치로부터 떨어지지 아니하고 차륜 및 스프링 등 구성품의 높이 감소 및 마모를 보상하는 구조이어야 한다.
② 현가장치는 철도차량의 탈선윤중 감소전복 등을 방지하고 안전운행을 보장하도록 설계되어야 한다.
③ 공기스프링형식의 현가장치는 여객 등에 의한 하중이 변화하더라도 철도차량의 차체높이를 일정하게 유지할 수 있어야 하며, 운행중 한쪽의 공기스프링이 파손될 경우 자동적으로 좌우측의 차체 바닥면의 높이가 조정되는 보조장치 등을 갖추어야 한다

에 대한 동역학 모델링기법, 노후에 따른 특성치 변화를 가정하여 1차현가장치 특성이 사행동 임계속도에 미치는 영향에 대하여 분석하고자 한다.

윤축의 사행동 임계속도 해석을 위하여 그림2와 같은 윤축 모델을 설정하였다. 윤축의 운동방정식은 식 5와 같이 현가요소, 차륜답면형상과 같은 비선형성을 고려할 수 있도록 모델링하였으며 윤축 임계속도 해석은 수치적분방법을 이용하였다.

$$\begin{aligned}
 m\ddot{y} &= F_{Ly} + F_{Ry} + F_{sy} + N_R \sin(\delta_R - \phi) - N_L \sin(\delta_R + \phi) \\
 I_x \ddot{\psi} &= -I_y (V/r_0) \dot{\phi} + (R_{Rx} F_{Ry} - R_{Ry} F_{Rx}) + (R_{Lx} F_{Ly} - R_{Ly} F_{Lx}) \\
 &\quad + R_{Rx} N_R \sin(\delta_R - \phi) - R_{Lx} N_L \sin(\delta_L + \phi) + M_{Lz} + M_{Rz} + M_{sz}
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서, m : 윤축질량(kg), I_x, I_y : moment of inertia(kgm^2), y : 윤축의 좌우 변위(m)
 ψ : 윤축의 yaw 변위(rad), ϕ : 윤축의 roll 변위(rad), V : 속도(m/s), W_A : 축중(N)
 λ : 답면구배, r_0 : 차륜반경(m), a : 궤간의 반, 차륜 접촉점간 거리의 반(m)
 b : 축상스프링간 거리의 반(m), K_x, K_y : 축상스프링 전후, 좌우 강성(N/m)
 C_x, C_y : 축상스프링 전후, 좌우 감쇠계수(Ns/m), δ_L, δ_R : 차륜접촉점에서의 접촉각(rad)
 $R_{Lx}, R_{Ly}, R_{Lz}, R_{Rx}, R_{Ry}, R_{Rz}$: 접촉점의 위치벡터 성분, F_{Ly}, F_{Ry} : lateral creep force(N)
 F_{sy} : suspension force(N), N_L, N_R : normal force(N)
 M_{Lz}, M_{Rz} : spin creep moment(Nm^2), M_{sz} : suspension moment(Nm^2)

표 3은 윤축 임계속도 해석에 적용한 인자 및 특성치를 나타낸다. 1차스프링 현가요소 특성치는 그림 3과 같이 축상스프링 하중-변위 선도를 참조하여 선형화하거나 비선형특성을 고려한 해석을 수행하였다. 차륜/레일 접촉특성을 고려하여 차륜답면은 KNR40 답면, 레일은 50kgN 레일 두부형상을 적용하였다. 또한 현가장치 노후를 가정하여 특성치가 초기 정상조건에 비하여 약 20% 저하하였다고 가정하여 윤축 사행동에 대한 영향을 분석하였다.

표 3 윤축 임계속도 해석 물성치

parameter	description	value
m	wheelset mass(kg)	1400
I_x	moment of inertia(kgm^2)	965
I_y	moment of inertia(kgm^2)	0
W_A	axle load(N)	15
r_0	wheel radius(m)	0.43
a	half of the gage(m)	0.7175
b	half of the primary spring(m)	0.985
K_x	longitudinal stiffness of primary spring(N/m)	그림 3
K_y	lateral stiffness of primary spring(N/m)	그림 3
C_x	longitudinal damping of primary spring(Ns/m)	0
C_y	lateral damping of primary spring(Ns/m)	0
profile	wheel/rail	KNR40/ 50kgN

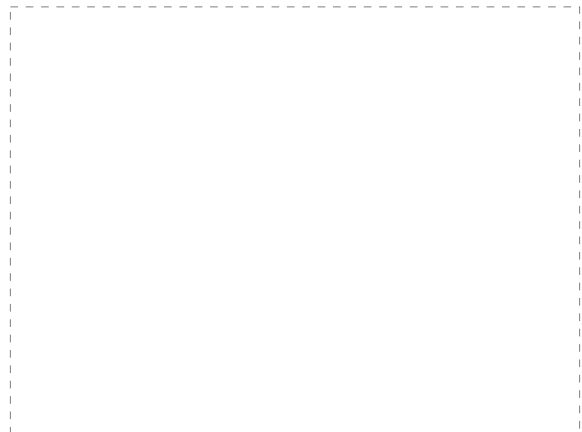


그림 3 축상스프링 특성

그림 4에서와 같이 현가요소 특성을 정상조건과 노후조건으로 가정하고 윤축의 초기 외란에 대한 각각의 속도 대역에서의 윤축의 횡방향 거동을 해석하였다. 해석결과, 정상조건하에선 약 75m/s 대역부터 윤축의 가동이 안정적으로 수렴하고 있음에 반하여 축상스프링 노후를 가정하여 특성치를 20% 저감한 노후조건하에선 약 65m/s 대역부터 윤축의 거동이 수렴하고 있음을 알 수 있다. 따라서 축상스프링의 노후를 가정한 윤축의 거동 해석으로부터 윤축 사행동 임계속도는 초기 정상조건에 비하여 약 10% 이상 저감될 것으로 판단된다. 실제 차량에 있어서 1차현가계 구성요소인 축상지지장치는 매우 다양한 형태로 적용되고 있으며 차량의 노후에 따라 축상지지장치의 특성이 상이하고 본 해석에서 가정한 수치보다 더 취약한 상황이 발생할 수 있다. 따라서 안정된 승차감 확보 측면의 관점외에도 고속주행시 안전성 확보 차원에서 현가장치 구성요소에 대한 적절한 특성치 관리와 적정 내구연한 기준치 도출에 대한 체계적인 연구가 시급하다고 판단된다.

4. 차륜담면형상에 의한 영향 분석

철도차량의 차륜은 차량의 하중을 지지하면서 레일위로 차량을 안내하는 중요부품으로서 차륜의 담면형상은 외관상으로 유사하지만 그 사용목적에 따라 적합한 형상으로 설계된다. 담면형상의 종류에 따라 곡선구간에서의 선회 성능이 양호한 담면, 직선구간에서의 고속주행 성능이 우수한 담면 등 각각의 특성이 다르다. 차륜담면은 차량의 주행거리가 누적됨에 따라서 그림 5와 같이 플랜지부의 마모가 발생하기 시작한다. 이는 주로 급곡선 운용빈도가 높고 디스크제동방식의 부수차량에서 통상적으로 발생하는 마모 유형이라 할 수 있다. 또한 그림 6과 같이 담면부의 오목한 마모가 발생하기도 한다. 이러한 유형은 담면제동방식을 적용하고 있는 화차나 동력차량에서 종종 발생하는 유형이라 할 수 있다.

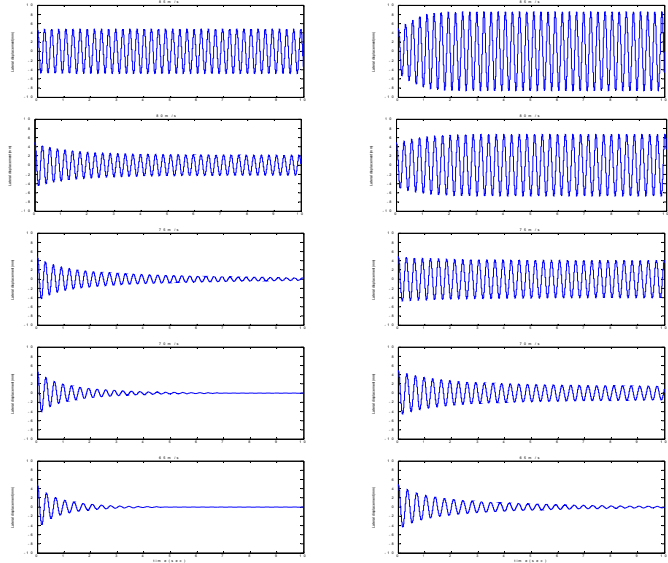
플랜지 마모량은 기존 철도차량용 KNR40담면의 경우 년 250,000km 주행시 약 5mm이상의 플랜지 마모가 발생하고 있으며, 고속철도차량의 경우에는 누적주행거리 증가에 따라 플랜지두께는 감소하고 등가담면구배(equivalent conicity)는 증가하여야 함에도 불구하고 반대의 불균일한 이상 마모현상이 발생하는 사례도 발생하고 있다. 이러한 현상은 차륜의 삭정주기를 단축시켜 유지보수 비용을 증가시키는 단점외에도 차량의 안정성측면에서는 임계속도를 저하시켜 영업속도 대역으로까지 사행동을 유발시킬 가능성도 배제할 수 없다.



그림 5 차륜플랜지 마모 유형



그림 6 차륜담면부 마모 유형



(a) 정상조건

(b) 노후조건

그림 4 축상스프링 특성 변화에 따른 윤축 거동 해석

한편, 차량 주행시 차륜에 대한 안전성 확보를 위하여 건교부 “철도차량 안전기준에 관한 규칙”에는 제 54조, 제 55조에 차륜 및 플랜지에 대한 안전기준을 명시하고 있다. 이에 의하면 차륜의 치수에 대한 관리 기준이 규정되어 있으나 현 국내 철도차량이 차종은 매우 다양하고 고속차량의 개발 운용에 부합한 차륜담면부의 형상관리측면이 강조되고 있는 선진국 추세에 이를 들면 이에 대한 연구 및 기준 마련이 시급하다고 판단된다. 따라서 본 절에서는 차륜에 의한 사행동 안정성 확보 측면에서 차륜의 마모가 임계속도에 미치는 영향에 대하여 분석하고자 한다.

주행거리 누적에 따라 차륜의 마모가 진전되고 이에 따른 차량의 임계속도 변화를 분석하고자 철도차량에 대한 사행동 비선형 임계속도 해석을 수행하였다. 해석에 적용한 차량모델은 여객차량 모델을 대상으로 하였으며 궤도는 50kgN 레일을 모델로 하였다. 차륜담면형상은 표 4에서와 같이 누적 주행거리별로 실측한 구배 1/40인 기존철도 여객차량용 KNR40 차륜담면형상 샘플 데이터를 적용하였다.

차륜 마모에 따른 임계속도 해석결과, 표4에서와 같이 주행거리 누적에 따라 차륜의 마모는 진전되어 플랜지 마모량은 증가하게 된다. 이에 따라 레일과의 기하학적 접촉해석으로부터 산출되는 차량동역학 거동측면에서 중요 인자로 활용되는 등가담면구배는 그림 7에서와 같이 점차 증가하고

표 4 주행거리 누적에 따른 임계속도 해석 결과

누적주행거리(km)	플랜지 두께(mm)	플랜지마모(mm)	등가담면구배	임계속도(m/s)
0	32.0	0.0	0.043	88
31,666	29.7	2.3	0.075	76
101,367	27.2	4.8	0.113	66
182,978	25.9	6.1	0.118	64
267,000	25.3	6.7	0.117	56

있음을 알 수 있다. 그림 8과 같이 차량 임계속도 해석 결과를 살펴보면 주행거리 누적에 따라 점차 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 누적주행거리에 따라 증가답면구배는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보임에 있음에도 불구하고 임계속도는 저감하고 있음을 알 수 있다. 이는 임계속도 해석시 차륜의 복잡한 답면형상이 고려되어 비선형적 특성이 반영된 결과라 할 수 있다.

따라서, 통상적으로 영업속도 대역에서의 차량의 사행동 발생 예방을 위하여 차량 설계시 차량의 임계속도를 충분히 상향하여 설계 하지만, 최근 차량 영업운용속도의 향상, 고속철도차량의 운용, 누적 주행거리의 증가 등으로 차륜의 마모 및 손상이 증가하는 추세를 고려하면 고속주행에 따른 차량의 안정성 확보 측면에서 차륜에 대한 기존 획일적 치수관리체계에서 벗어나 과학적이고 체계적인 차륜답면형상에 대한 관리기준 연구가 필요하다고 판단된다.

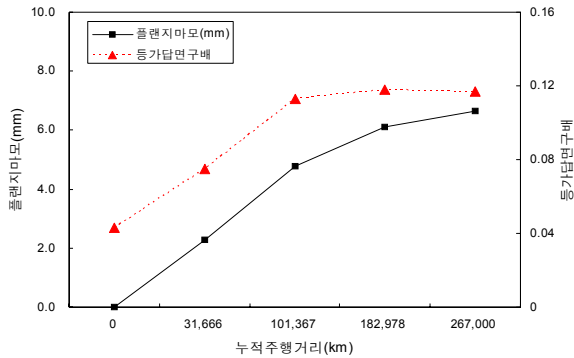


그림 7 누적주행거리에 따른 플랜지마모, 증가답면구배와의 관계

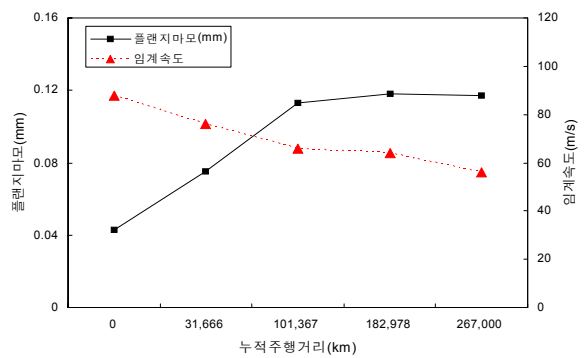


그림 8 누적주행거리에 따른 플랜지마모, 임계속도와의 관계

5. 결론

사행동에 의한 주행안전성 저해 메커니즘 분석 관련하여 사행동 특성 및 사행동에 미치는 영향 인자에 대하여 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

사행동 영향 인자중 특히 1차현가계 전후, 좌우방향 강성은 축상스프링의 비선형 특성에 의한 영향과 현가장치 노후에 따른 축상스프링 특성치 변화에 의한 영향이 운축의 사행동 임계속도에 미치는 영향이 중요하다고 할 수 있다. 현가장치 노후를 가정한 임계속도 해석 결과, 현가장치 특성치 저하에 따라 임계속도가 저하함을 알 수 있었다. 따라서 안정된 승차감, 고속주행시 안전성 확보 차원에서 현가장치 구성요소에 대한 적절한 특성치 관리와 적정 내구연한 기준치 도출에 대한 체계적인 연구가 시급하다고 판단된다.

차륜과 레일의 기하학적 접촉과 관련된 차륜의 마모는 답면형상의 변화를 초래하고 차륜/레일의 기하학적 접촉거동에 대한 비선형성을 증가시켜 운축의 임계속도 및 차량의 주행안전성을 저하시키는 요인으로 작용한다. 따라서 최근 차량의 고속화, 고속철도차량의 운용, 누적 주행거리의 증가 등으로 차륜의 마모 및 손상이 증가하는 추세를 고려하면, 고속주행에 따른 차량의 안정성 확보 측면에서 차륜에 대한 기존 획일적 치수관리체계에서 벗어나 과학적이고 체계적인 차륜답면형상에 대한 관리기준 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 박광복, "철도차량공학", 삼성종합출판, 1999
2. Vijay K. Garg, and Rao V. Dukkipati, "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press, 1984
3. 일본기계학회편, "鐵道車輛のダイナミクス", 전기차연구회(주), 1996