

곡선부 주행 차량의 마모특성에 관한 연구

A Study on the Wear Characteristics of R/S Passing through Curves

이희성†

Hi Sung Lee

Abstract For the wear characteristics assessment of Saemaul train passing through curves, an analysis model for multi-car system has been developed. By using this model and ADAMS/Rail, sensitivity analyses have been conducted for the wear characteristics by changing the related parameters. At low speed, the wear number and the sliding mean of right wheel showed higher than left wheel, while those of left wheel showed higher than right wheel at high speed. According to the decrease of curve radius, the wear number and the sliding mean were increased. When the length of transition curve was increased, the wear number and the sliding mean was increased. And according to increase of cant, the wear number and the sliding mean were increased.

Keywords : Wear number, Curves, Sliding mean, Friction coefficient

요 지 곡선 통과 새마을호 열차의 마모 특성을 평가하기 위하여 다량 편성 해석모델이 사용된다. 이 모델과 ADAMS/Rail를 사용하여 마모 특성과 관련된 변수의 변화에 따른 민감도 해석이 수행된다. 저속에서 우측 차륜의 마모도와 미끄럼도가 좌측 차륜보다 높으나, 고속의 경우는 좌측 차륜이 우측 차륜보다 높다. 곡선반경의 감소에 따라 마모도와 미끄럼도가 증가한다. 완화곡선의 길이가 증가하면 마모도와 미끄럼도가 증가한다. 또한 캔트가 증가하면 마모도와 미끄럼도가 증가한다.

주요어 : 마모도, 곡선반경, 미끄럼도, 마찰계수

1. 서론

차륜과 레일의 상대적인 접촉특성에 의하여 결정되는 차륜 마모는 다른 기계류에서 발생하는 마모와 다르게 매우 높은 헤르츠 접촉조건하에서 작용하는 접촉력과 상대 미끄럼율에 영향을 받는 특성을 가진다. 레일 위로는 매우 다양한 철도차량들이 주행하게 되면 차륜 담면과 레일 담면 형상이 마모에 의해서 변화하게 된다. 차륜 또는 레일에서 발생하는 마모는 해당 부품의 유지보수 또는 교환 비용과 증가되며, 차륜과 레일의 담면의 형상이 변화하게 되어 차량의 주행안정성과 주행추진성능 등 동역학적 거동에도 영향을 미치고 주행안전성을 저해시키는 역할도 할 수 있다. 특히, 곡선부에서 의 차륜은 하나의 차륜이 서로 다른 형상의 레일들 위를

주행하여야 하는데 차륜 마모의 양상이 서로 다를 수 있으며, 어느 곡선형상의 레일 위를 주행 시 마모가 두드러질 경우 차륜과 레일 모두에서 유지보수 비용이 증가하게 되며 안전에도 문제가 발생한다.

강부병 등[1-3]은 경부고속열차의 기존선 주행시에 궤도틀림량, 차륜형상 및 곡선반경 변화에 따른 차륜마모 예측, 플랜지 윤활이 차륜마모에 미치는 영향 등에 대한 검토를 수행하였고, 최정흠 등[4]은 한국형 고속열차의 동력차, 동력객차, 객차의 3량을 연결시켜 작성한 모델과 동적 거동해석 자료를 기초로 주어진 다양한 트랙 조건에서 차륜에 발생하는 마모를 시뮬레이션을 통해 예측하였다. 또한 이희성 등[5]은 고속철도차량이 기존선 주행시 차륜 플랜지에 고체윤활제 적용에 따른 플랜지 마모 감소의 영향을 분석하였다

본 연구에서는 마모량이 많은 곡선부를 통과하는 열차의 마모특성을 평가하기 위하여 상세설계에 의한 해석모델을 개발하고 이를 이용하여 ADAMS/Rail[6]로 전산해석을 수

† 책임저자 : 회원, 서울산업대 철도전문대학원
E-mail : hslee@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6811, FAX : 02-971-6877

행하였다. 특히 해석은 곡선주행성능에 영향을 주는 주행속도와 곡선반경, 완화곡선 길이, 캔트 등의 궤도조건 변수들의 상관관계와 민감도 등에 관한 연구를 수행하였다.

2. 차륜 마모도 평가인자

마모도에 대한 평가인자로는 일반적으로 마모지수(wear index, W_N)를 이용한다. 그 정의는 식(1)과 같다[5].

$$W_N = F_1 \cdot \xi + F_2 \cdot \eta \quad (1)$$

F_1 은 진행방향 크립력(longitudinal creep force)이고, ξ 는 진행방향 크리피지(longitudinal creepage), F_2 는 횡방향 크립력(lateral creep force), η 는 횡방향 크리피지(lateral creepage)이다. 마모가 발생하는 에너지와 비례하는 인자라는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 차륜의 마모가 크게 발생하는 선두 대차 첫 번째 차륜을 대상으로 수치해석으로부터 구해진 크립력과 크리피지를 이용하여 마모지수를 구하고 비교하였다. 곡선 구간에서는 내측 차륜보다 외측 차륜에서 횡압 등이 커져서 마모가 더 크게 되므로 외측 차륜을 대상으로 하였다.

3. 전산해석

해석 프로그램으로는 ADAMS/Rail을 이용하였으며 Table 1과 같은 새마을호 디젤동차(PMC)를 대상으로 입력 데이터를 작성하였다. 차량 모델링을 위해서 몇 가지 가정을 하였다. 먼저 철도차량들 간의 연성효과가 작기 때문에 한 량만을 대상으로 모델링하였다. 또한 주행안전성, 궤도 피로, 승차감, 임계속도 등의 인자들로 인하여 주로 저주파수 대역을 다루게 되며 이때 차체, 대차 프레임, 차축, 차륜 등의 부품은 강체로 가정하였다. 차륜과 레일의 접촉력 계산에는 ADAMS/Rail에 구비된 Kalker's FASTSIM 알고리즘을 이용하였다. 이때 차륜과 레일 사이의 마찰계수는 보다 심각한 상황을 고려하기 위하여 비교적 큰 값인 0.4로 가정하였는데 차량 진동의 외력에 해당하는 차륜/레일 접촉력이 커지게 되므로 가능한 진동 상황 중 큰 값을 고려하게 된다. 이러한 값은 본 연구에서는 안전한 범위의 설계 인자를 찾는 과정이므로 타당하다고 할 수 있다.

3.1 차량모델

Fig. 1은 해석 시 사용된 새마을호 디젤동차의 실제 모습과 열차 모델링을 나타내고 있으며, 대차와 차체의 모델링을 결합한 상태를 나타내고 있다.

3.2 선로와 차륜모델

선로모델은 Fig. 2와 같이 곡선구간의 좌우, 상하 불규칙계도 데이터를 사용하여 해석을 수행하였다. 차륜과 레일모델은 새마을호 디젤동차 차량에 적용되고 있는 차륜담면 구배 1/40인 차륜과 50kg-N인 레일을 Fig. 3과 같이 모델링하여 해석에 사용하였다.

4. 해석결과

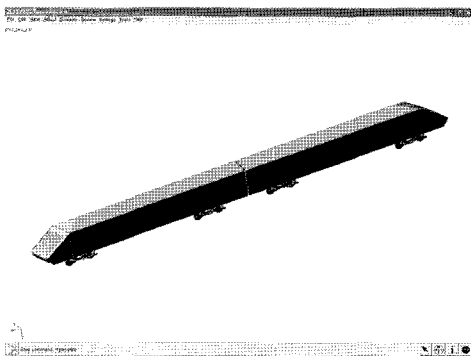
새마을호 열차의 해석모델을 이용하여 ADAMS /Rail로 일

Table 1. Specifications of the PMC type bogie for passenger vehicle

Index	Parameters	Units	Value
Car body	Length	m	23.56
	Mass of empty car	ton	54.97
	Moment of inertia of rolling	Mg·m ²	114.72
	Moment of inertia of pitching	Mg·m ²	1551.0
	Moment of inertia of yawing	Mg·m ²	1525.0
	Height of gravity center on the rail	m	1.414
Bogie frame	Bogie frame mass	ton	3.5
	Moment of inertia of rolling	Mg·m ²	1.58
	Moment of inertia of pitching	Mg·m ²	1.6
	Moment of inertia of yawing	Mg·m ²	3.01
	Height of gravity center on the rail	m	0.52
Axle	Wheelsets mass	ton	2.65
	Moment of inertia of rolling	Mg·m ²	1.36
	Moment of inertia of pitching	Mg·m ²	1.36
	Moment of inertia of yawing	Mg·m ²	0.003
	Wheel diameter	m	0.43
Dimension	Distance between two bogie centers	m	15.2
	Distance between two axles	m	2.5
	Distance between 1st suspensions	m	0.5
	Distance between 2nd suspensions	m	2.0
Primary suspension	Longitudinal stiffness	MN/m	0.379
	Lateral stiffness	MN/m	0.379
	Vertical stiffness	MN/m	0.758
Secondary suspension	Longitudinal stiffness	MN/m	0.24
	Lateral stiffness	MN/m	0.24
	Vertical stiffness	MN/m	0.94
Primary damping	Vertical damping	MNs/m	0.03
	Yaw damping	MNs/m	0.169
Secondary damping	Lateral damping	MNs/m	0.04
	Vertical damping	MNs/m	0.04
Friction coefficient			0.4



(a) Saemaul-Ho diesel power car



(b) Fully Arranged PMC train

Fig. 1. PMC train

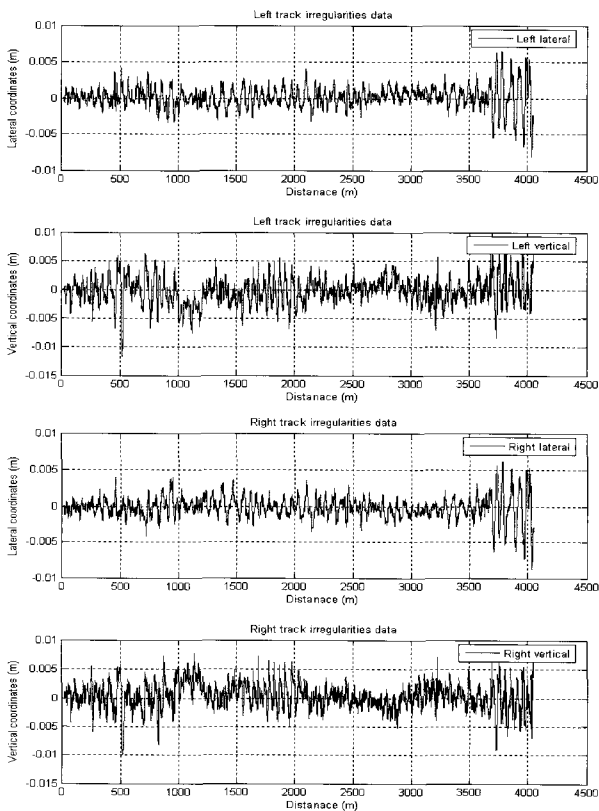


Fig. 2. Irregularity track model

정한 곡선부 형상에서 새마을호 열차의 마모해석을 수행하였다. 해석은 불규칙 트랙 곡선주행 시 통과속도와 곡선반경, 완화곡선길이, 캔트량의 변화에 따른 마모도, 미끄럼도, 마찰계수 등과 같은 마모특성을 검토하였다. 궤도조건은 철도건설규칙의 2등급 선로를 기준으로 하였다.

4.1 통과속도 변화

통과속도의 변화에 따른 새마을호 열차의 마모특성을 검토하기 위해 전산해석을 수행하였다. Fig. 4~Fig. 6은 일정한 곡선반경(R1200), 완화곡선길이(cant×1300배), 캔트(160mm)에서 통과속도 10, 20, 30, 40m/s로 주행하는 차량에 대한 ADAMS/ Rail의 해석결과로 전두부 좌우측 차륜의 마모도, 미끄럼도 및 마찰계수를 나타내고 있다. Fig. 4와 Fig. 5에서와 같이 통과속도가 증가함에 따라 마모도와 미끄럼도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6에서와 같이 통과속도가 증가함에 따라 마찰계수는 감소함을 확인할 수 있었다.

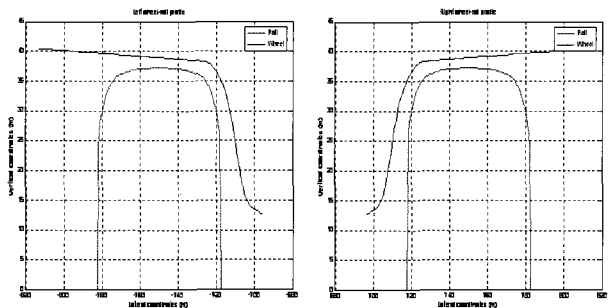


Fig. 3. Wheel model

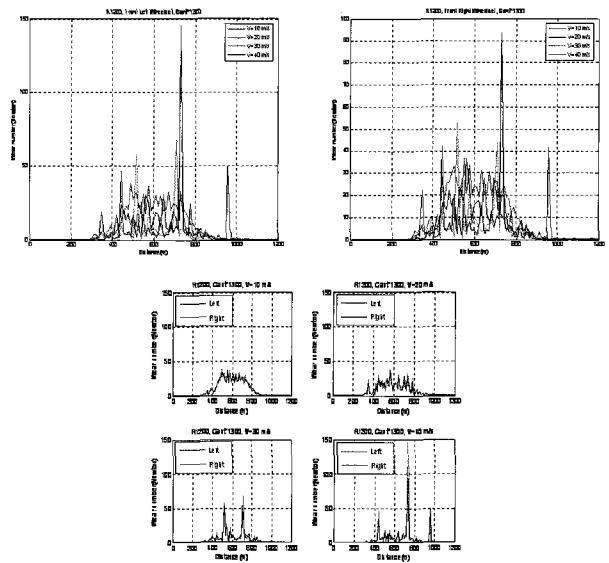


Fig. 4. Wear number for passing speed (R1200, cant×1300배, 160mm)

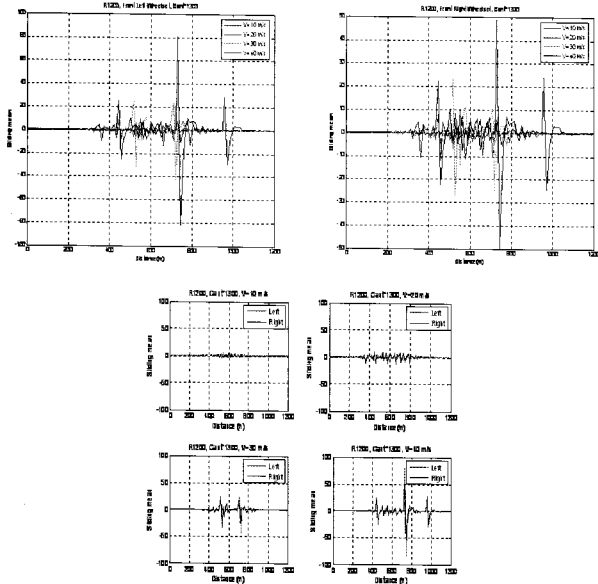


Fig. 5. Sliding mean for passing speed (R1200, cant×1300배, 160mm)

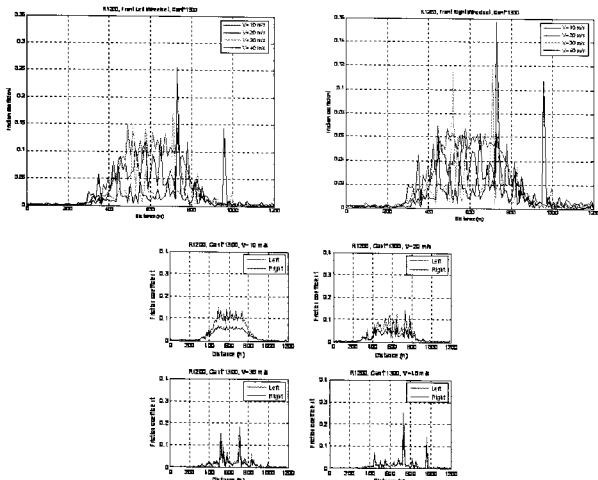


Fig. 6. Friction coefficient for passing speed (R1200, cant×1300배, 160mm)

4.2 곡선반경 변화

곡선반경의 변화에 따른 새마을호 열차의 마모특성을 검토하기 위해 전산해석을 수행하였다. Fig. 7~Fig. 9는 일정한 통과속도(30m/s), 완화곡선길이(cant×1300배), 캔트(160mm)에서 곡선반경 R400, R800, R1200, R1600에 따른 차량에 대한 ADAMS/Rail의 해석결과로 전두부 좌우측 차륜의 마모도, 미끄럼도 및 마찰계수를 나타내고 있다. Fig. 7과 Fig. 8에서와 같이 곡선반경이 감소함에 따라 마모도와 미끄럼도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 곡선반경 R800의 원곡선→완화곡선구간에서 마모도와 미끄럼도가 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 9에서의와 같이 곡선반경이 감소함에

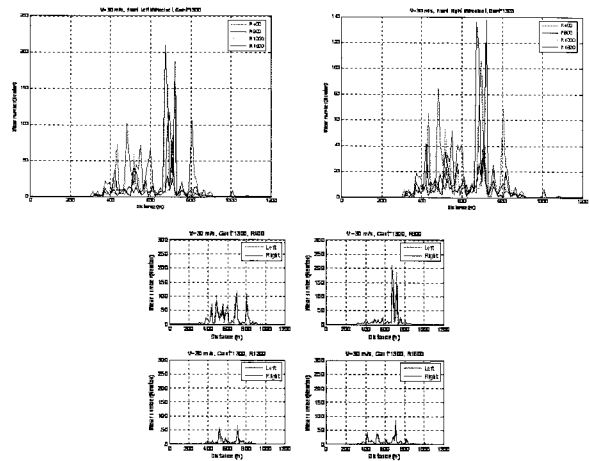


Fig. 7. Wear number for curvature (V=30m/s, cant×1300배, 160mm)

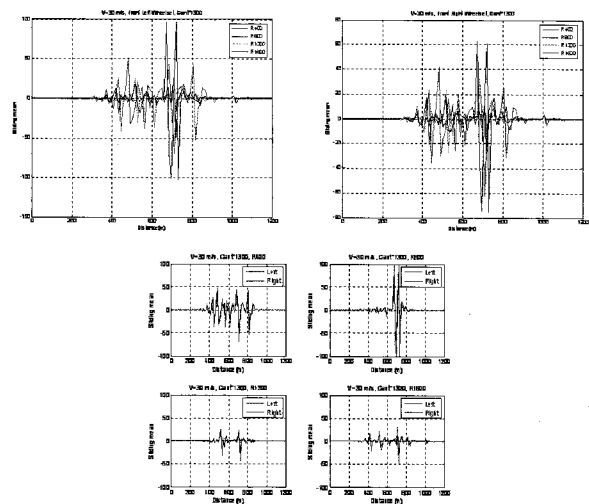


Fig. 8. Sliding mean for curvature (V=30m/s, cant×1300배, 160mm)

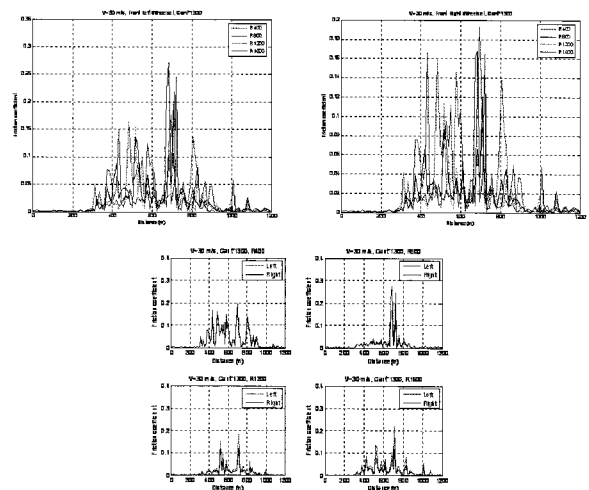


Fig. 9. Friction coefficient for curvature (V=30m/s, cant×1300배, 160mm)

따라 마찰계수가 증가함을 확인할 수 있었고 곡선반경 R800의 원곡선→완화곡선구간에서 마찰계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 완화곡선길이 변화

완화곡선길이의 변화에 따른 새마을호 열차의 마모특성을 검토하기 위해 전산해석을 수행하였다. Fig. 10~Fig. 12는 일정한 통과속도(30m/s), 곡선반경(R1200), 캔트(160mm)에서 완화곡선길이 cant×900배, cant×1100배, cant×1300배, cant×1500배에 따른 차량에 대한 ADAMS/Rail의 해석결과로 전두부 좌우측 차륜의 마모도, 미끄럼도 및 마찰계수를 나타낸다. Fig. 10과 Fig. 11에서와 같이 완화곡선길이의 증가함에 따라 마모도와 미끄럼도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한

cant×1100배에서는 완화곡선→원곡선구간이 cant×1100배에서는 원곡선→완화곡선구간이 마모도와 미끄럼도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 12에서와 같이 완화곡선길이 cant×1100배에서는 완화곡선→원곡선구간이 cant×1100배에서는 원곡선→완화곡선구간이 마찰계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4.4 캔트량 변화

캔트량의 변화에 따른 새마을호 열차의 마모특성을 검토하기 위해 전산해석을 수행하였다. Fig. 13~Fig. 15는 일정한 통과속도(30m/s), 곡선반경(R1200), 완화곡선길이(cant×1300배)에서 캔트량 120, 140, 160, 180mm에 따른 차량에 대한 ADAMS/Rail의 해석결과로 전두부 좌우측 차륜의 마모도,

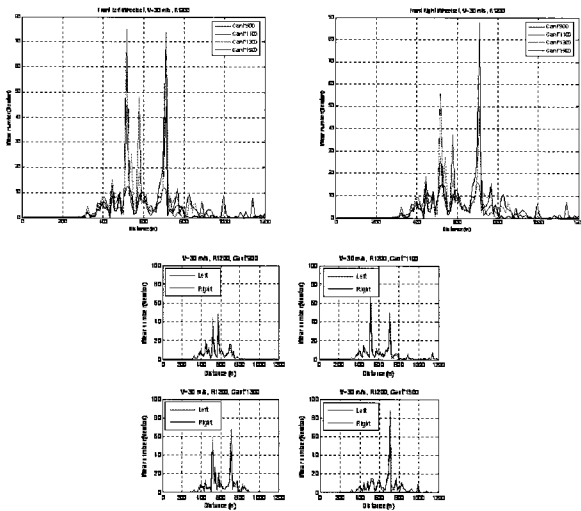


Fig. 10. Wear number for transition curve (V=30m/s, R1200, 160mm)

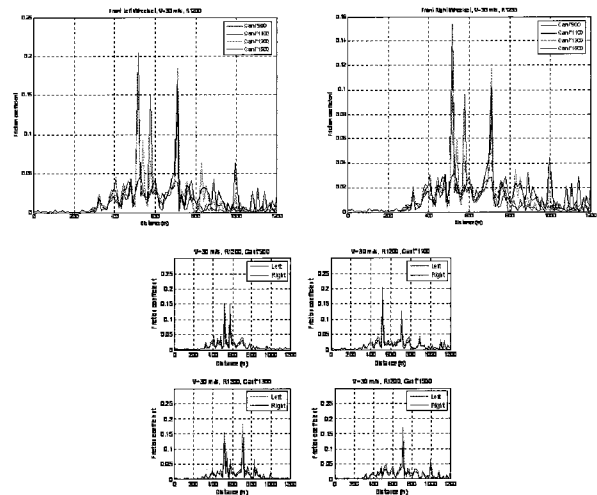


Fig. 12. Friction coefficient for transition curve (V=30m/s, R1200, 160mm)

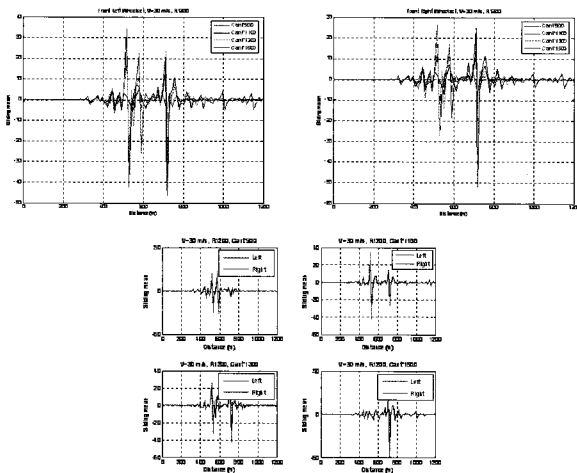


Fig. 11. Sliding mean for transition curve (V=30m/s, R1200, 160mm)

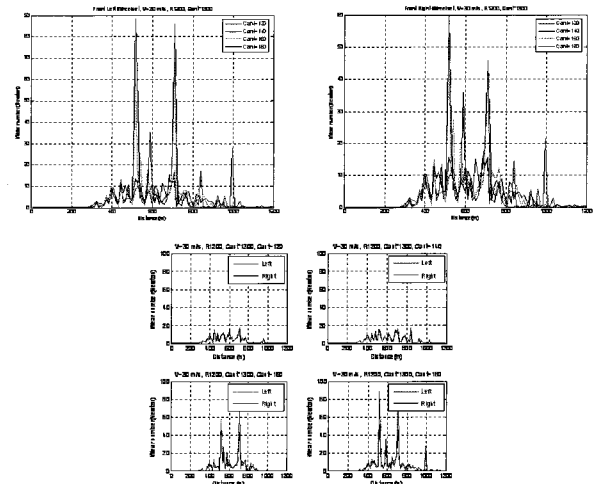


Fig. 13. Wear number for cant (V=30m/s, R1200, cant×1300배)

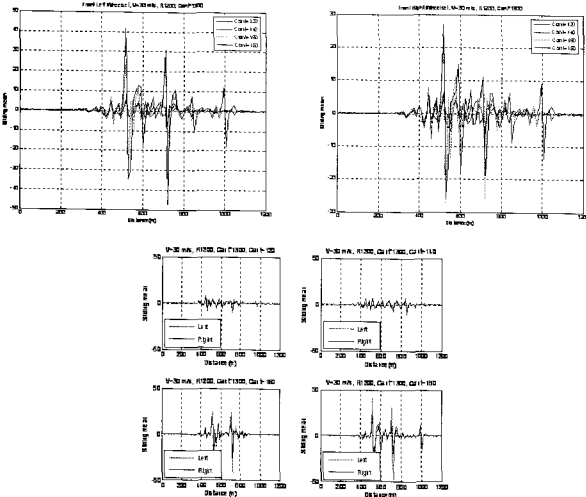


Fig. 14 Sliding mean for cant (V=30m/s, R1200, cant×1300배)

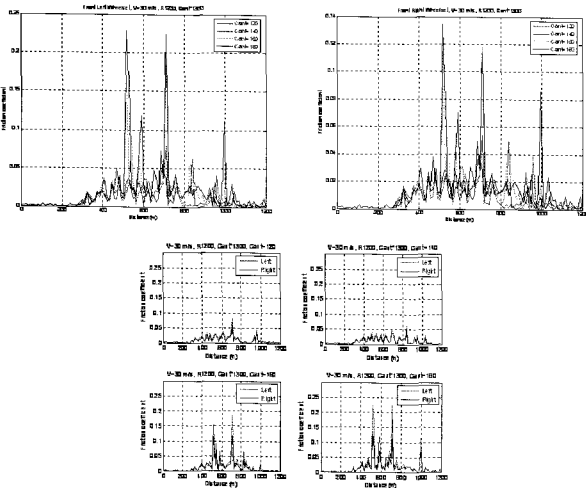


Fig. 15 Friction coefficient for cant (V=30m/s, R1200, cant×1300배)

미끄럼도 및 마찰계수를 나타내고 있다.

Fig. 13과 Fig. 14에서와 같이 캔트량의 증가함에 따라 마모도와 미끄럼도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 캔트량이 160mm와 180mm의 경우 완화곡선→원곡선구간과 원곡선→완화곡선구간에서 마모도와 미끄럼도가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. Fig. 15에서와 같이 캔트량의 증가에 따라 마찰계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 캔트량이 160mm와 180mm의 경우 완화곡선→원곡선구간과 원곡선→완화곡선구간에서 마찰계수가 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

5. 결론

곡선부를 통과하는 새마을호 열차의 마모특성을 평가하기

위해 열차해석모델을 이용한 ADAMS/ Rail의 전산해석을 통한 마모특성과 관련된 변수들의 민감도를 궤도조건 가정 하에서 각각의 변수들을 차례로 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 그러므로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 통과속도의 변화

통과속도가 증가함에 따라 마모도와 미끄럼도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 통과속도가 증가함에 따라 마찰계수는 감소함을 확인할 수 있었다.

(2) 곡선반경의 변화

곡선반경이 감소함에 따라 마모도와 미끄럼도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 곡선반경 R800의 원곡선→완화곡선구간에서 마모도와 미끄럼도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 곡선반경이 감소함에 따라 마찰계수가 증가하였고, 곡선반경 R800의 원곡선→완화곡선구간에서 마찰계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 완화곡선길이의 변화

완화곡선길이의 증가함에 따라 마모도와 미끄럼도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 cant×1100배에서는 완화곡선→원곡선구간이 cant×1100배에서는 원곡선→완화곡선구간이 마모도와 미끄럼도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 완화곡선길이 cant×1100배에서는 완화곡선→원곡선구간이 cant×1100배에서는 원곡선→완화곡선구간이 마찰계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 캔트량의 변화

캔트량의 증가함에 따라 마모도와 미끄럼도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 캔트량이 160mm와 180mm의 경우 완화곡선→원곡선구간과 원곡선→완화곡선구간에서 마모도와 미끄럼도가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 캔트량의 증가에 따라 마찰계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 캔트량이 160mm와 180mm의 경우 완화곡선→원곡선구간과 원곡선→완화곡선구간에서 마찰계수가 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 차륜/레일 마모예측 및 유지보수 기준연구(I), 한국고속철도건설공단 연구보고서(1999).
2. 차륜/레일 마모예측 및 유지보수 기준연구(II), 한국고속철도건설

- 공단 연구보고서(2000).
3. 강부병, 이희성(2003), “경부고속철도의 기존선 주행시 차륜 마멸 특성에 관한 연구,” 한국윤활학회 논문집, Vol.19, No.4 August 2003, pp.187-194.
 4. 최정흠, 문태선, 김기환, 한동철(2003), “고속철도 차량의 차륜과 레일간의 마모예측,” 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.369-376.
 5. 이희성, 강부병(2006), “고속열차 차륜 플랜지 마모,” 한국윤활학회 논문집, Vol.22, No.1 Feb. 2006, pp.33-39.
 6. Mechanical Dynamics (2005), “ADAMS/RAIL User’s Guide.”
 7. 건설교통부(2005), “철도건설규칙,” 건설교통부.
- (2007년 11월 1일 논문접수, 2007년 12월 5일 심사완료)