

곡선부 통과 열차의 주행안전성 평가에 관한 연구

A Study on the Assessment of Running Safety of Railway Vehicle passing through Curve

박광수[†] · 이희성^{*}

Kwang-Soo Park · Hi Sung Lee

Abstract For the running safety assessment of Saemaul train passing through curves, an analysis model for multibody system has been developed. By using this model and ADAMS/Rail, sensitivity analyses depending on the variation of parameters related to the derailment coefficients have been conducted. At low speed, the derailment coefficient and the unload ratio of right wheel showed higher than left wheel, while those of left wheel showed higher than right wheel at high speed. According to decrease of curve radius, the derailment coefficient and the unload ratio were increased. When the length of transition curve was increased, the derailment coefficient was increased but there was no change on the unload ratio. According to the increase of cant, the derailment coefficient and the unload rate were increased.

Keywords : curve radius, running safety, derailment coefficient

요 지 곡선통과 새마을호 열차의 주행안전성을 평가하기 위하여 다물체동역학 해석모델이 사용된다. 이 모델과 ADAMS/Rail를 사용하여 탈선계수와 관련된 변수의 변화에 따른 민감도해석이 수행된다. 저속에서 우측차륜의 탈선계수와 윤중감소율이 좌측차륜보다 높으나, 고속의 경우는 좌측차륜이 우측차륜보다 높다. 곡선반경의 감소에 따라 탈선계수와 윤중감소율이 감소된다. 완화곡선의 길이가 증가하면 탈선계수는 증가하나 윤중감소율은 변화가 없다. 캔트가 증가하면 탈선계수와 윤중감소율이 증가한다.

주요어 : 곡선반경, 주행안전성, 탈선계수

1. 서론

선로등급에 따라 정해진 규정속도로 운행하는 열차는 비교적 안전하다고 알려져 있지만 실제로 얼마나 안전한가에 대하여 정량적으로 평가하기는 매우 어렵다. 이는 차륜과 레일의 상호작용이 단순하지 않으며, 차량시스템도 복잡하고, 곡선반경, 캔트, 완화곡선 선로조건, 등의 궤도틀림 정도, 차륜/레일 형상, 운전조건 등의 다양한 영향인자들이 복합적으로 결합하여 탈선을 유발시키기 때문이다. 이에 따라 철도차

량의 주행안전성 평가항목으로는 탈선계수와 진동특성으로 대별할 수 있다. 탈선에 대한 위험도를 지수로서 표현할 수 있는 탈선계수의 측정방법과 평가기준은 아직까지 국내에서 규격이나 기준으로 제정되어 있지 않아 한국철도기술연구원의 철도차량의 주행안전성 평가방법(안)을 적용하여 평가하고 있다. 또한, 철도차량의 진동특성 측정방법은 한국산업규격(KS)에서 규격으로 정해 놓고 있지만, 이에 대한 평가기준도 아직까지 제정되어 있지 못한 상태이다. 차량의 주행안전성에 대한 평가방법은 미흡하지만 현재 국제규격인 UIC 518 기준에서 탈선계수에 대하여 규정하고 있으며, 시험을 통하여 계속 개정되고 있다[1].

본 연구에서는 탈선의 위험도가 높은 곡선부 통과 열차의 주행안전성평가를 위하여 실제 운행중인 새마을호 동차(PMC)를 이용하여 곡선부 통과시에 탈선에 영향을 주는 통과속도와

[†] 책임저자 : 회원, 서울산업대 철도전문대학원 박사과정, 한국철도시설공단
E-mail : pks0022@hanmail.net
TEL : (02)993-1792 FAX : (02)976-7877
^{*} 교신저자 : 회원, 서울산업대 철도전문대학원 교수
E-mail : hslee@snut.ac.kr

곡선반경, 완화곡선 길이, 캔트 등의 궤도조건 변수들과의 상관관계와 민감도 등에 관한 연구를 ADAMS/Rail을 이용하여 수행하였다.

2. 탈선메커니즘

탈선은 차륜이 레일에서 이탈하는 현상으로 윤축과 좌우 레일의 기본적인 관계, 탈선 시의 윤축 거동해석 등의 연구를 통하여 탈선 메커니즘을 보다 명확히 파악할 수 있다. 탈선의 형태는 ① 타고 오르는 탈선, ② 미끄러져 오르는 탈선, ③ 뛰어 오르는 탈선의 3가지로 구분하며, 특히 주행 시에 주의할 요하는 것은 큰 횡방향 외력을 받지 않아도 발생할 수 있는 타고 오르는 탈선이다[2][3].

2.1 타고 오르는 탈선 메커니즘

Fig. 1은 윤축이 양의 공격각인 상태에서 좌측으로 비스듬히 주행하며, 우차륜의 플랜지가 레일과 접촉하고 있다. 이 상태에서 좌차륜이 더욱 회전하게 되면, 이 좌차륜이 플랜지 경사면에서 레일의 견부(肩部)를 타고 오르면서 좌측으로 더 진행하려고 한다. 이를 타고 오르는 탈선이라 하며, 플랜지 경사면의 각도(차륜/레일의 접촉각)가 클 때나 공격각이 작을 때, 플랜지 접촉면의 마찰계수가 작을 때에는 타고오름이 발

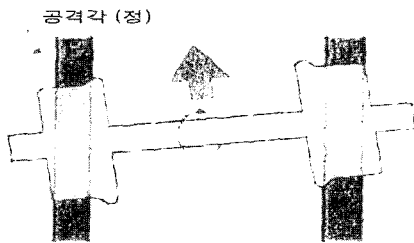


Fig. 1. Attack angle of wheelset

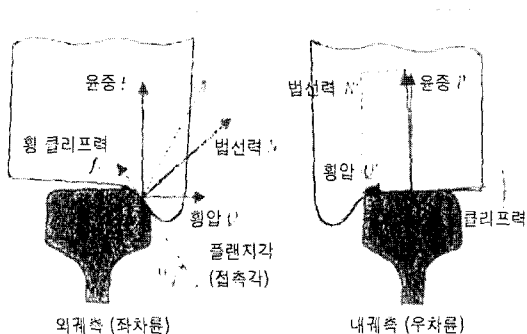


Fig. 2. Interacting forces between wheel and rail

생하기 어렵다.

Fig. 2는 플랜지와 레일의 접촉면에서 외궤측 좌차륜이 타고 오르는 경우에 차륜과 레일의 접촉면에 작용하는 법선력과 크리프력을 나타낸다. 여기서 크리프력이란 차륜과 레일 접촉면사이의 미세한 미끄럼에 의해서 발생하며, 크리프력의 레일 횡단면 방향 분력을 횡 크리프력, f_y 이라 한다. 이때의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{외궤측 좌차륜 : } Q &= N \sin \alpha - f_y \cos \alpha \\ P &= N \cos \alpha - f_y \sin \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{내궤측 우차륜 : } Q' &= N' \sin \alpha' - f_y' \cos \alpha' \\ P' &= N' \cos \alpha' - f_y' \sin \alpha' \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 타고 오르는 탈선에 대한 안전성 평가

차륜 플랜지가 레일과 접촉한 상태에서 타고 오름이 시작되는 외궤측 차륜에서는 항상 식(1)의 관계가 성립한다. 따라서 (1)식으로부터 아래의 관계를 얻을 수 있다[4].

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan \alpha - (f_y/N)}{1 + (f_y/N) \tan \alpha} \quad (3)$$

위 횡압과 윤중비 Q/P를 탈선계수라고 부르며, 식(3)에서 계산된 수치를 한계탈선계수 $(Q/P)_c$ 이라 한다. 차륜과 레일 접촉각 α 가 작을 때, 횡 크리프력과 법선력의 비 f_y/N 이 클 때 한계탈선계수 $(Q/P)_c$ 는 작아진다. 한계탈선계수를 이용하면 차륜이 타고 오름 여부를 판단할 수 있다. 주행중의 탈선계수가 한계탈선계수에 대하여 어느 정도 여유를 갖고 있는가를 조사함으로써 타고 오르는 탈선에 대한 안전성 평가 지표로 폭넓게 이용되어 왔다. 또한 플랜지부가 레일에 접촉하여 타고 오름을 개시하면 차륜 플랜지가 레일 위를 타고 오를 때까지 20mm 이상 외궤측 차륜이 상승해야 한다. 이는 탈선계수가 한계탈선계수에 도달하였다고 해서 즉시, 탈선하는 것이 아니라 플랜지 접촉상태에서 일정시간 주행한다는 것을 의미한다.

3. 전산해석

본 논문에서는 새마을호 디젤동차(PMC)에 대하여 열차 해석모델을 개발하고, 이를 ADAMS/Rail [5]를 이용하여 동적 해석을 수행하였다.

3.1 새마을호 디젤동차(PMC)

새마을호 디젤동차(PMC)를 대상차량으로 사용하였다[6]. Fig. 3은 새마을호 디젤동차의 실제 모습이다.



Fig. 3. Running Saemaul-Ho diesel power car

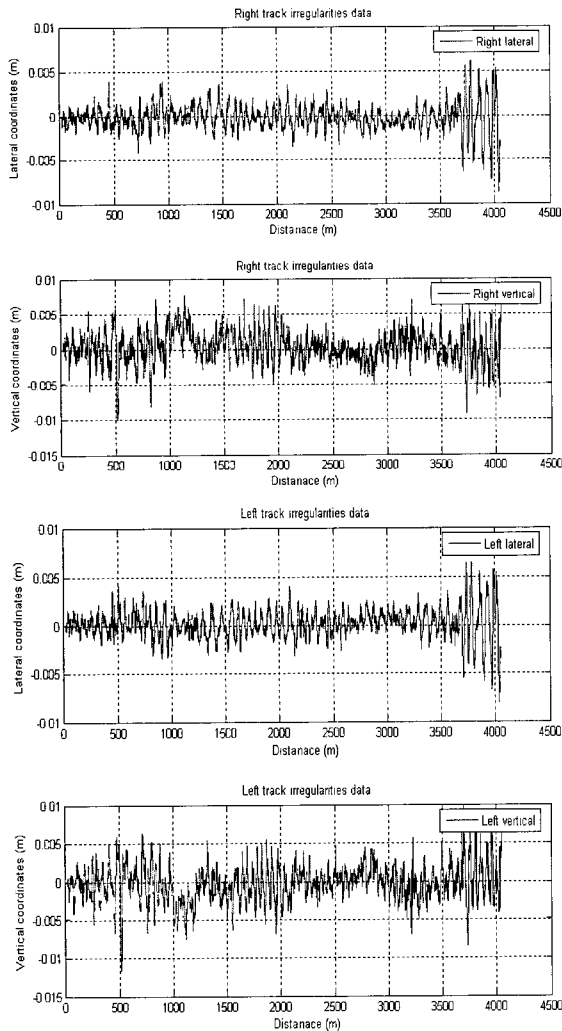


Fig. 4. Track irregularities model

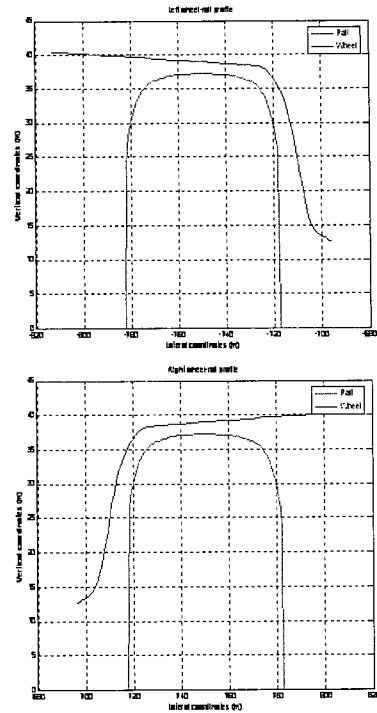


Fig. 5. Wheel and rail models

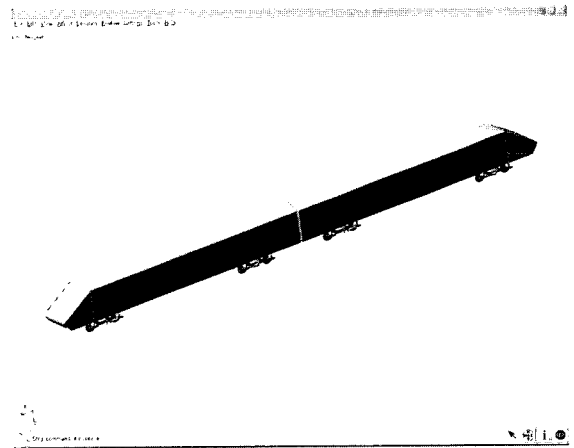


Fig. 6. Fully Arranged PMC

3.2 트랙과 차륜모델

트랙모델은 Fig. 4와 같이 곡선구간의 좌우, 상하 궤도틀림 데이터를 사용하여 해석을 수행하였다. 차륜모델은 새마을호 디젤동차 차량에 적용되고 있는 차륜으로 답면구배가 1/40이고, 레일모델은 KS 50N인 레일을 Fig. 5와 같이 모델링하여 해석에 사용하였다[8].

3.3 해석모델

Fig. 6은 해석에 사용된 새마을호 디젤동차의 다량편성, 열차 모델링을 나타내고 있으며, 대차와 차체의 모델링을 결합

Table 3. Technical specification data of the PMC

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
Secondary damping	Yaw damping	MNs/m	0.169
	Lateral damping	MNs/m	0.04
	Vertical damping	MNs/m	0.04
Friction coefficient			0.4

한 상태를 나타내고 있다. Table 3은 새마을호 디젤동차에 대한 동특성 해석에 필요한 수치를 나타내고 있다[7].

Table 4. Conditions of curved tracks for simulation

Variable \ Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Running speed(m/s)	10, 20, 30, 40	30	30	30
Curve radius(m)	1200	400, 800, 1200, 1600	1200	1200
Transition Curve(m)	Cant×1300배	Cant×1300배	Cant×900배, Cant×1100배, Cant×1300배, Cant×1500배	Cant×1300배
Cant(mm)	160	160	160	120, 140, 160, 180

4. 해석결과

새마을호 디젤동차(PMC) 다량 편성열차모델의 동적해석을 ADAMS/Rail를 이용하여 수행하였다. 곡선부 통과속도와 곡선반경, 완화곡선길이, 캔트량의 변화에 따른 탈선계수, 운중감소율, 마찰계수, 좌우측 차륜과 레일의 접촉점 위치 등과 같은 안전성을 검토하였다. Table 4는 해석시 사용된 주행속도와 곡선구간의 선로조건을 나타내고 있으며 궤도조건은 철도건설규칙의 2급선을 기준으로 하였다[8].

4.1 통과속도 변화(Case 1)

통과속도의 변화에 따른 새마을호 열차의 주행안전성을 검토하기 위해 전산해석을 수행하였다. Fig. 7~Fig. 8은 일정한 곡선반경(R1200), 완화곡선길이(cant×1300배), 캔트(160mm)에서 통과속도 10, 20, 30, 40m/s로 주행하는 차량에 대한 ADAMS/Rail의 해석결과로 전두부 좌우측 차륜의 탈선계수, 운중감소율을 나타내고 있다. Fig. 7와 Fig. 8에서와 같이 통과속도가 저속구간에서는 좌측보다는 우측차륜이 통과속도가 고속구간에서는 우측보다는 좌측차륜의 탈선계수와 운중감소율이 더 크게 나타났고, 이는 고속구간에서 원심력에 의하여 외측궤도의 접촉력 증가로 판단된다. 또한 통과속도 20, 30m/s보다는 10m/s가 탈선계수와 운중감소율이 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

4.2 곡선반경 변화(Case 2)

곡선반경의 변화에 따른 새마을호 열차의 안전성을 검토하기 위해 전산해석을 수행하였다. Fig. 9~Fig. 10은 일정한 통과속도(30m/s), 완화곡선길이(cant×1300배), 캔트(160mm)에서 곡선반경 R400, R800, R1200, R1600에 따른 차량에 대한

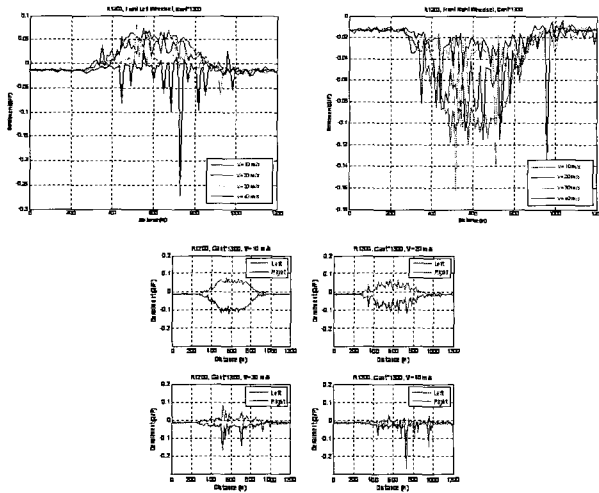


Fig. 7. Derailment coefficients depending on curving speed variations (R1200, cant×1300배, 160mm)

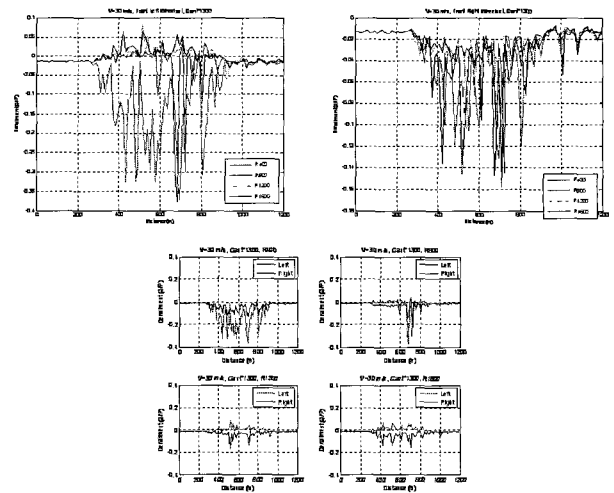


Fig. 9. Derailment coefficients depending on radius variations (V=30 m/s, cant×1300배, 160mm)

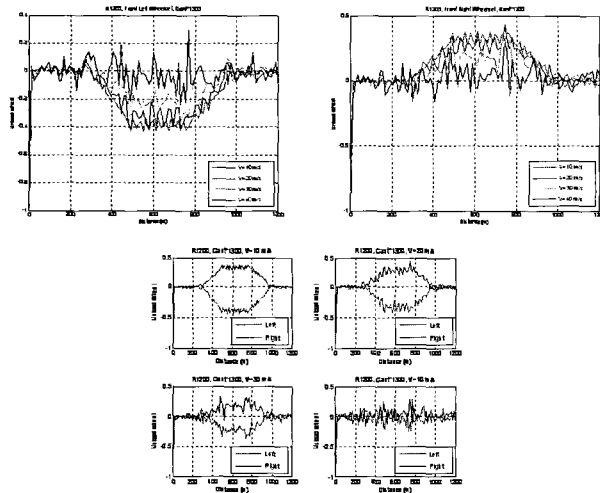


Fig. 8. Unload ratios depending on curving speed variation (R1200, cant×1300배, 160mm)

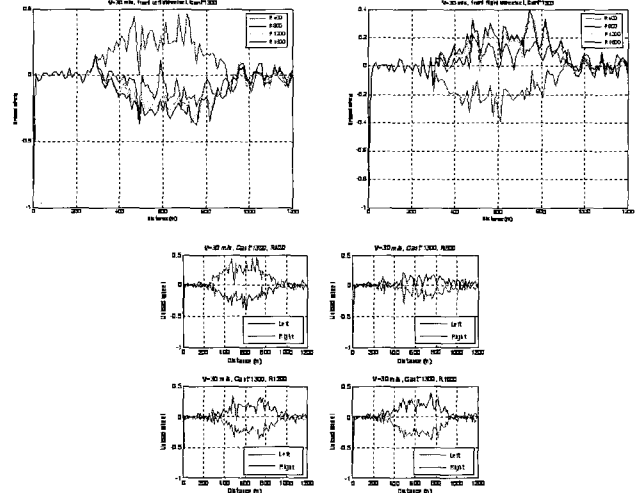


Fig. 10. Unload ratios depending on radius variations (V=30 m/s, cant×1300배, 160mm)

ADAMS/Rail의 해석결과로 전두부 좌우측 차륜의 탈선계수, 운중감소율을 나타내고 있다. Fig. 9와 Fig. 10에서와 같이 곡선반경이 감소함에 따라 탈선계수와 운중감소율이 증가함을 확인하였다. 또한 곡선반경 R800의 원곡선→완화곡선구간에서 탈선계수가 증가하는 것을 확인하였다.

4.3 완화곡선길이 변화(Case 3)

완화곡선길이의 변화에 따른 새마을호 열차의 안전성을 검토하기 위해 전산해석을 수행하였다. Fig. 11~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 탈선계수, 운중감소율, 를 나타내고 있다. Fig. 11과 Fig. 12에서와 같이 완화곡선길이의 증가에 따라 탈선계수는 증가하였고, 운중감소율의 변화는 없는 것으로 나타났다. 또한 원곡선→완화곡선구간이 완화곡선→원곡선 구간보다 탈선계수가 증가하는 것을 확인하였다.

4.4 캔트량 변화(Case 4)

캔트량의 변화에 따른 새마을호 열차의 안전성을 검토하기 위해 전산해석을 수행하였다. Fig. 13~Fig. 14는 일정한 통과속도(30m/s), 곡선반경(R1200), 완화곡선길이(cant×1300배)

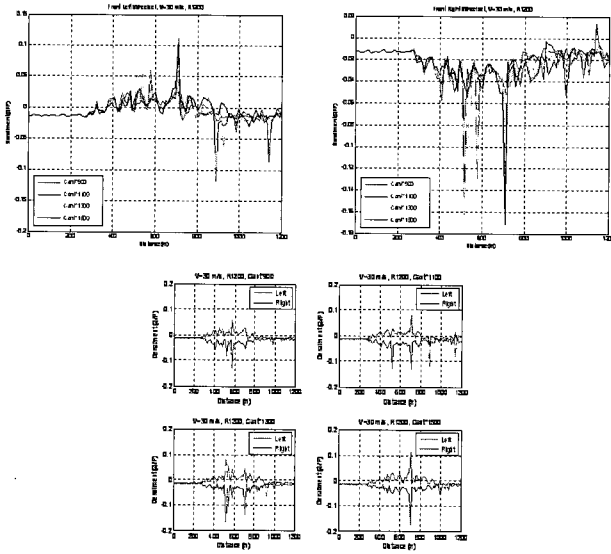


Fig. 11. Derailment coefficients depending on transition curve variations (V=30m/s, R1200, 160mm)

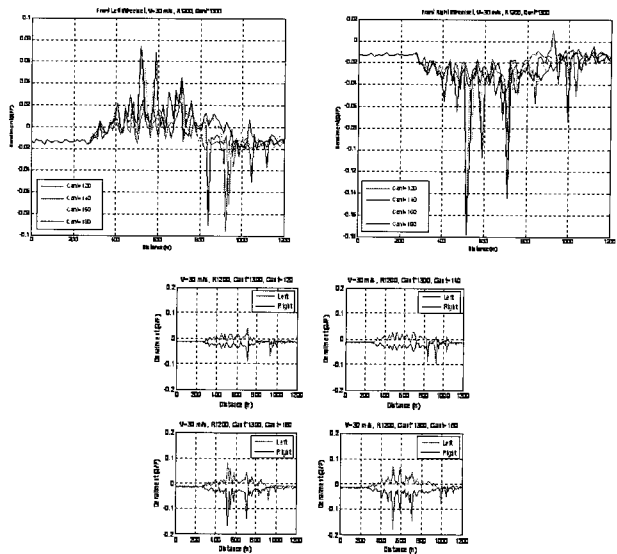


Fig. 13. Derailment coefficients depending on cant variations (V=30m/s, R1200, cant×1300배)

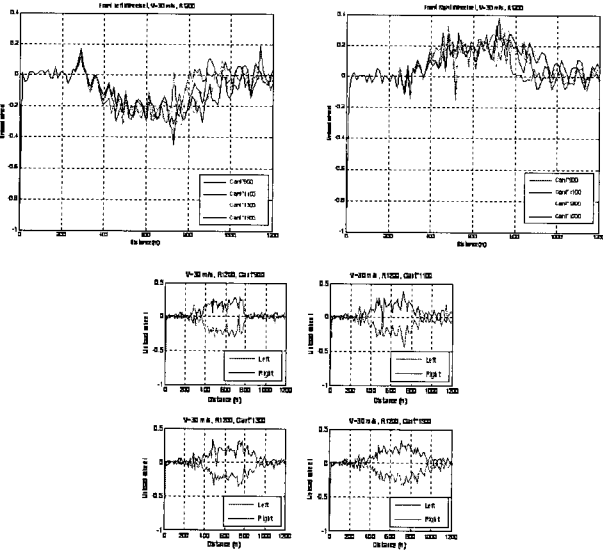


Fig. 12. Unload ratios depending on transition curve variations (V=30m/s, R1200, 160 mm)

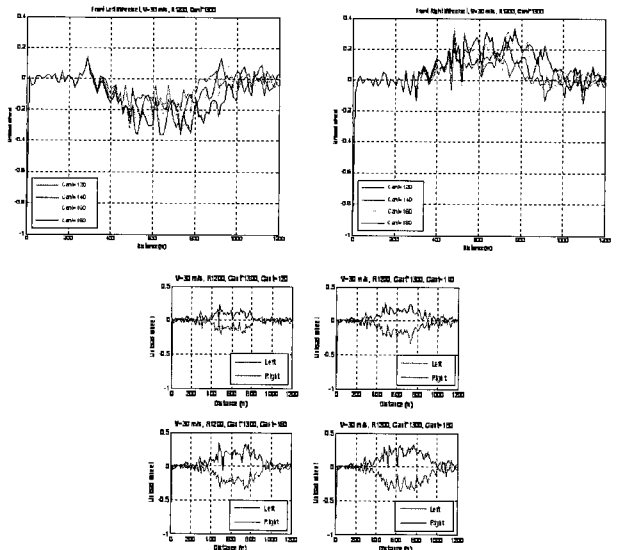


Fig. 14. Unload ratios depending on cant variations (V=30m/s, R1200, cant×1300배)

에서 캔트량 120, 140, 160, 180mm에 따른 차량에 대한 ADAMS/Rail의 해석결과로 전두부 좌우측 차륜의 탈선계수, 윤증감소율을 나타내고 있다. Fig. 13과 Fig. 14에서와 같이 캔트량의 증가에 따라 탈선계수와 윤증감소율은 증가하였고, 좌우측 차륜에 대한 변화는 없었다.

5. 결론

곡선부를 통과하는 새마을호 열차의 주행안전성 평가를 위

해 다량편성 해석모델을 이용한 ADAMS/Rail의 전산해석을 통한 탈선계수와 관련된 변수들의 민감도를 궤도조건 가정 하에서 각각의 변수들을 차례로 변화시켜 가면서 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 통과속도의 변화에 따른 안전성 검토결과, 통과속도가 저속구간에서는 좌측보다는 우측차륜이 통과속도가 고속구간에서는 우측보다는 좌측차륜의 탈선계수와 윤증감소율이 더 크게 나타났고, 통과속도 20, 30 m/s보다는 10 m/s

가 탈선계수와 윤증감소율이 크게 나타남을 확인하였다.

- (2) 곡선반경의 변화에 따른 안전성 검토결과, 곡선반경이 감소함에 따라 탈선계수와 윤증감소율이 증가함을 확인하였고, 곡선반경 R800의 원곡선→완화곡선구간에서 탈선계수가 증가하는 것을 확인 하였다.
- (3) 완화곡선길이의 변화에 따른 안전성 검토결과, 완화곡선길이의 증가에 따라 탈선계수는 증가하였고, 윤증감소율의 변화는 없는 것으로 나타났고, 원곡선→완화곡선구간이 완화곡선→원곡선구간보다 탈선계수가 증가하는 것을 확인하였다.
- (4) 캔트량의 변화에 따른 안전성 검토결과, 캔트량의 증가에 따라 탈선계수와 윤증감소율은 증가하였고, 좌우측 차륜에 대한 변화는 없는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1. 허현무(2003.7), “경제적 차륜담면관리기술 개발,” 한국철도기술연구원.
- 2. 이시다 히로아키 외 4인(1995.8), “탈선에 대한 안전성평가지표의 연구,” 鐵道總研報告, Vol.9, No.3.
- 3. 미야모토, 마사유키(1996.3), “차량의 탈선 메카니즘,” 鐵道總研報告, Vol.10, No.3.
- 4. 이시다 히로아키(2004.11), “급곡선부 저속주행시의 타고 오르는 탈선에 대한 안전성 평가,” RRR.
- 5. Mechanical Dynamics(2005). “ADAMS/RAIL User’s Guide”.
- 6. 철도청(1994), “전후동력새마을동차(PMC) 주요장치 부품 목록”.
- 7. 함영삼(1996.8), “철도차량의 진동방지에 관한 연구,” 한국철도기술연구원.
- 8. 건설교통부(2005.9), 철도건설규칙.

(2007년 9월 10일 논문접수, 2007년 10월 10일 심사완료)