철도차량의 곡선 구간별 주행안전성 평가
A Running Safety Assessment for Curve Section of Railway Vehicle

엄범규* 현석** 안천헌*** 이희성****

Eom, Beom-Gyu Hyun, Seok An, Cheon-heon Lee, Hi Sung

ABSTRACT

I accomplished a curve section traveling safety assessment analysis followed with railway condition for elevation of a curve passage speed of train utilizing trail analysis model. As a result, we confirmed that excess cant influence in badly traveling safety of train followed with cant change and cant shortage influence in badly traveling safety in case of large a curve radius and traveling safety of originally a curve section is most wrong. Also we confirmed that shortage of relief a curve length influence in badly traveling safety followed with change of relief a curve length.

---

1. 서론

열차 탈선사고의 예방은 이로 인한 결과적 손해가 인간의 생명과 직접적으로 연관되어 있어 철도운영기관 및 연구기관의 매우 중요한 논제가 되고 있다. 탈선의 유형으로는 지진에 의한 궤간 확대, 축파손과 열차의 과속과 같은 특별한 원인들로 규정되어질 수 있는 요소들로 야기된다. 탈선의 또 다른 유형으로는 한 가지 특정요소가 탈선에 대한 원인으로 규정될 수 없고, 철도차량과 궤도 관계가 조합된 여러 요소가 복합적으로 탈선을 발생시킨다. 특정한 원인들에 의한 탈선유형은 특정한 원인들을 제거하기 위한 조치들을 시행하는 것으로 탈선을 예방할 수 있으나, 한 가지 특정요소가 아닌 차륜/레일의 접촉(차륜과 레일의 상호접촉이 단순한 선형이 아니고 비선형이고)과 차량/궤도/운전조건(차량의 구조가 복잡하고, 곡선반경, 캔트, 완화곡선 등의 선로조건, 궤도의 틀림정도나 레일의 형상, 상태 등)에 의해 다양한 요인이 관계가 복합적으로 발생하는 탈선은 아직 원인들이 규명되지 않고 있다. 그러므로 이에 대한 규명을 위해 다양한 탈선유형의 연구개발들이 요구된다(1). 선로등급에 따라 정해진 규정속도로 운행하는 열차는 비교적 안전하다고 알려져 있지만 과연 얼마나 안전한가에 대하여 열차의 탈선 위험도를 측정하고 평가하여 정량적으로 표현하기는 어렵다. 철도차량의 주행안전성에 대한 평가방법으로 현재 세계적으로 사용되고 있는 대표적인 시험 및 평가방법은 미흡하지만 탈선계수를 사용하여 차량의 주행안전성 평가를 하고 있다. 현재 세계적인 규격인 UIC 518기준에서 탈선계수에 대하여 규정하고 있으며, 시험을 통하여 계속 개정되고 있다. 국내와 같이 곡선이 많은 선로조건에서는 운행속도의 제한을 받는 곡선부를 최소화하여 차량의 곡선 통과속도 향상을 도모하는 것이 절대적이나 현실적으로 이는 막대한 비용과 시간이 소요되므로 곡선 추종성이 매우 높고 동시에 고속주행 안정성이 유지할 수 있는 대차 시스템 기술개발 연구를 하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 탈선의 위험도가 높은 곡선부 통과하는 열차의 속도향상을 도모하기 위하여 국내외 탈선 안전도 평가 절차와 방법에 대한 검토를 통하여 탈선안전도 평가변수를 정립하고 이를 바탕으로 선로조건에 따른 ADAMS/Rail을 이용한 전산해석을 통해 곡선 구간별 주행안전성 평가를 수행하였다.

---

* 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 정회원

E-mail : zoonbi@naver.com

TEL : (02)970-6877 FAX : (02)976-6877

** 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 한국철도공사

*** 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정, 서울메트로 인재개발원 교수

**** 서울산업대학교 철도전문대학원 교수

2. 탈선에 영향을 미치는 변수

본 연구에서는 곡선별(R400, R1200, 2급선)에 해당하는 속도제한과 선로조건을 기준으로 실제 운행 중인 새마을호 디젤동차(PMC)에 대하여 ADAMS/Rail을 이용하여 전산해석을 수행하였다.

2.1 곡선반경(Radius of curve)

선로는 고속운전, 곡선저항, 전망, 선로보수 등과 관련해서 전부 직선인 것이 바람직하지만, 지형 등의 이류로 곡선을 피할 수는 없다. 곡선반경은 캔트, 슬랙, 철도차량의 곡선부 통과속도 등과 밀접한 연관을 가지고 있으며, 탈선계수에 직접적인 영향을 미쳐 철도차량의 주행안전성 평가에 큰 부분을 차지한다. 철도차량이 곡선부를 주행할 때는 외측으로 원심력이 작용하여 외측 레일의 윤중이 증가하고, 내측 레일의 윤중이 감소하여 열차주행이 불안정하게 된다. 이 원심력을 없애기 위해 외측 레일을 내측 레일보다 높게 하는 캔트를 부설하여 원심력과 중력을 균형되게 한다. 이때 캔트량은 곡선방경과 열차속도에 따라 결정된다(2).

2.2 완화곡선(Transition curve)

곡선과 직선의 접속개소에 있어서는 이 캔트를 연속적으로 체감시키는 구간(완화곡선구간)이 필요하게 되는데 이것이 그림1과 같은 완화곡선이다. 따라서 완화곡선은 직선과의 접속부분에서 반경이 무한대, 원곡선과의 접속부분에서의 반경은 원곡선의 반경과 같게 된다. 이와 같이 곡선 내측의 레일은 변화없이 수평적으로 곡률의 크기가 커지는데 반해, 외측의 레일은 곡률이 증가함에 따라 캔트가 함께 증가하게 되어 점진적으로 수평틀림이 발생하게 되고 이는 완화곡선상의 구조적인 평면성틀림을 만들어 낸다. 이렇게 완화곡선 상에서 부득이 존재하는 평면성틀림은 그림2에서와 같이 3점지지 현상을 유발하여 탈선의 위험을 한층 높이게 된다(3).

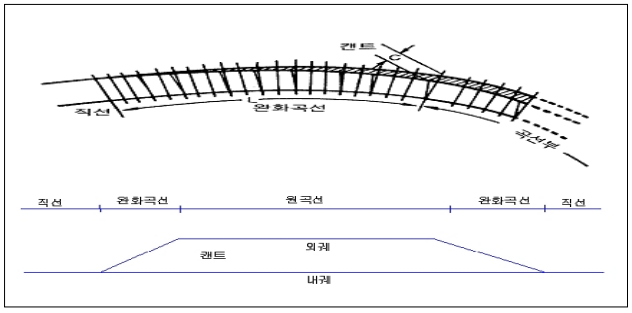


그림1. Transition curve and cant decrease

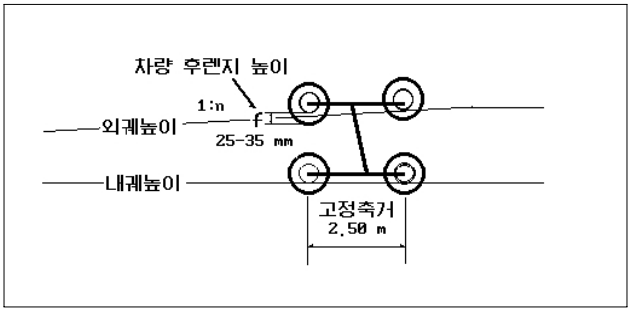


그림2. 3-point support phenomenon

2.3 캔트(Cant)

철도차량이 곡선부를 통과하는 경우에는 그 통과속도에 비례하여 원심력이 곡선 외측으로 작용하기 때문에 차량이 곡선 외방으로 전복할 위험과 외궤측 레일에 큰 윤중 및 횡압이생기고, 승차감 저해 및 열차의 저항을 증가 시킨다. 이와 같은 원심력에 의한 악영향을 방지하기 위하여 이 힘을 상쇄 또는 경감하도록 곡선 선로에서는 외측 레일을 내측 레일보다 높게 하여 차량중심에 작용하는 원심력과 중력과의 합력 작용선이 궤도 중심을 통하도록 함으로서, 열차운전의 안전, 궤도부담의 평균화를 꾀하고 승차감을 좋게 한다. 이와 같은 궤도에 경사를 붙인 것 즉, 외축 레일과 내측 레일의 고저차를 캔트라 한다(3).

3. 전산해석

ADAMS는 여러 개의 구성요소로 이루어 진 시스템의 시간변화에 따른 동적거동 특성을 컴퓨터를 통해 모의해석 할 수 있는 소프트웨어이다. 이러한 ADAMS의 특징을 바탕으로 ADAMS/Rail은 virtual prototyping 환경에서 정확한 철도차량 설계를 위해 특별히 제작된 프로그램으로서 철도 차량의 전체 거동을 가시적인 실제 시뮬레이션을 수행할 수 있게 한다. ADAMS/Rail을 이용하면 쉽고 빠르게 매개 변수로 되어진 철도차량을 제작하게 해주며 현가장치, 윤축과 차륜/레일 접촉을 개선시킬 수 있게 해준다. 또한 차량의 안전성, 탈선 안전성 및 궤도의 하중 등을 결정하기 위해 kinematic, static, dynamic 시뮬레이션을 할 수 있다(4).

3.1 트랙과 차륜모델

트랙모델은 곡선구간의 좌우, 상하 불규칙궤도 데이터를 사용하여 해석을 수행하였다. 차륜과 레일 모델은 새마을호 디젤동차 차량에 적용되고 있는 Korean wheel로 차륜답면 구배가 1/40과 50 kg-N인 레일을 그림3과 같이 모델링하여 해석에 사용하였다.

3.2 차량모델

그림4는 해석 시 사용된 새마을호 디젤동차의 열차 모델링을 나타내고 있으며, 대차와 차체의 모델링을 결합한 상태를 나타내고 있다.

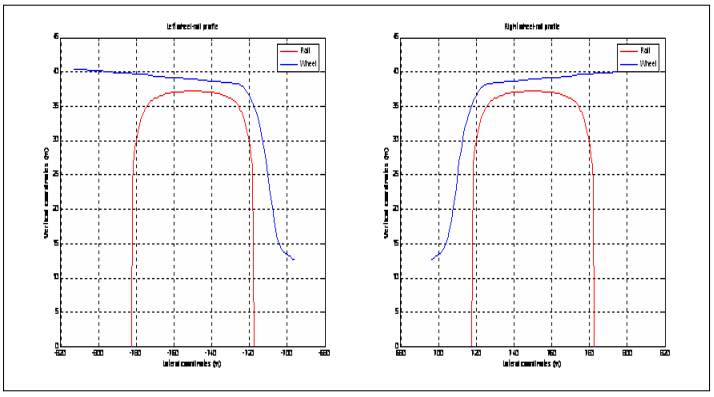


그림3. Wheel model

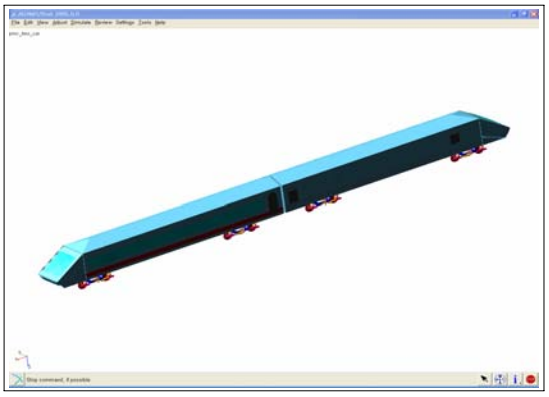


그림4. Fully Arranged PMC train

4. 해석결과

일정한 속도로 곡선부를 통과하는 차량은 직선→완화곡선→원곡선→완화곡선→ 직선 등의 다양한 형태의 선로조건을 주행하게 된다. 그러므로 새마을호 열차의 다량편성 해석모델을 이용하여 차량의 곡선부 통과속도를 향상하기 위한 선로조건에 따른 곡선부 구간별 주행안전성 평가 해석을 수행하였다.

4.1 선로조건

(1) 곡선부 속도제한

곡선부 통과하는 차량의 속도제한은 도표 1에서와 같이 2급선에 해당하는 경부 제1본선을 기준으로 R400에 해당하는 속도제한 90 km/h와 R1200에 해당하는 속도제한 140 km/h를 해석에 사용하였다.

(2) 완화곡선, 캔트의 설정

완화곡선, 캔트의 설정은 선로의 등급에 따라 Table 1에서와 같이 하여야 한다. 본 연구에서는 2급선으로 R400일 때 완화곡선길이 310 m, 캔트 166.5 mm, R1200일 때 완화곡선길이 250 m, 캔트 134.3 mm을 기준으로 선로조건을 결정하여 곡선부 통과 차량의 주행안전성 평가를 수행하였다.

도표 1. Speed limits of curve and setting value

Item	R400	R1200
Running speed(V)	90 km/h (25 m/s)	140 km/h (38.8 m/s)
Equilibrium cant $(C=11.8\frac{V^2}{R})$	238.95 mm	192.73 mm
Cant input value $(\sin\theta=\frac{C}{G})$	0.1665	0.1343
Transition curve length $(L=1300\times C)$	310 m	250 m

도표 2. Simulation condition

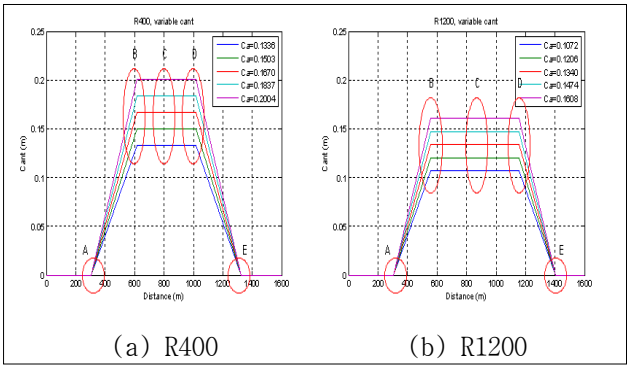
Condition		-20 %	-10 %	0 %	10 %	20 %
		case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
R400 V=90 km/h	Cant (mm)	0.1336	0.1503	0.167	0.1837	0.2004
R1200 V=140 km/h		0.1072	0.1206	0.134	0.1474	0.1608
R400 V=90 km/h	Transition curve (m)	250	280	310	340	370
R1200 V=140 km/h		200	225	250	275	300

4.2 해석조건

도표 2는 R400인 경우, 제한속도 90 km/h(25 m/s), R1200인 경우, 제한속도 140 km/h (38.8 m/s)로 균형 캔트값을 기준으로 -20~20 % 캔트량 변화에 따른 해석조건과 균형 캔트값에 따른 완화곡선 길이를 기준으로 -20~20 % 완화곡선길이 변화에 따른 해석조건을 나타내고 있다.

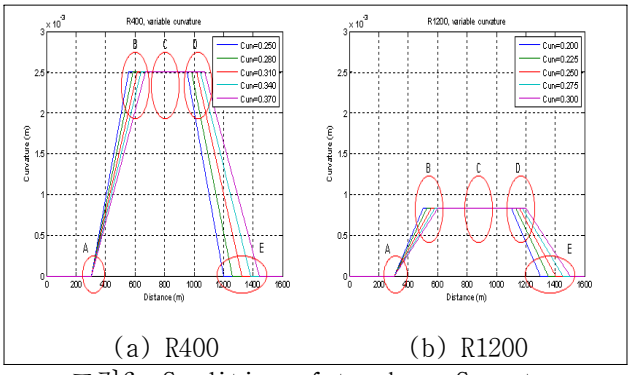
4.3 해석결과

캔트량의 변화와 완화곡선 길이의 변화에 따른 곡선부 통과 차량의 주행안전성 평가를 곡선부 전체 구간과 직선→완화곡선(section A), 완화곡선→원곡선(section B), 원곡선(section C), 원곡선→완화곡선(section D), 완화곡선→직선(section E)에 대하여 해석하였다. Fig. 5는 R400, R1200 곡선에 대한 해석구간과 캔트량의 변화를 나타내고 있다. Fig. 6은 R400, R1200 곡선에 대한 해석구간과 완화곡선 길이의 변화를 나타내고 있다



(a) R400 (b) R1200

그림5. Condition of track on cant variations



(a) R400 (b) R1200

그림6. Condition of track on Curvature variations

(1) 캔트량 변화

캔트량 변화에 따른 차량의 주행안전성 평가를 검토하기 위해 해석을 수행하였다. 그림7은 곡선반경 R400(V=90 km/h), R1200(V=140 km/h), 완화곡선길이(캔트×1300배)에서 캔트량의 변화에 따른 차량에 대한 해석결과로 곡선부 전체 구간의 전두부 좌우측 차륜의 탈선계수를 나타내고 있다. 그림7에서와 같이 R400의 경우, 캔트량이 증가에 따라 탈선계수도 증가하였고, 기준 캔트량인 167 mm에서 0.62의 탈선계수가 나타났다. R1200인 경우는 캔트량이 감소에 따라 탈선계수도 증가하였다. 이와 같은 결과로 곡선반경이 작은 경우 과잉캔트가 주행안전성에 악 영향을 미침을 확인할 수 있었고, 곡선반경이 큰 경우 캔트부족이 주행안전성에 악영향을 미침을 확인할 수 있었다. 그림8은 곡선반경 R400, R1200에서 캔트량의 변화에 따른 차량에 대한 해석결과로 곡선부 구간별 전두부 좌우측 차륜

의 탈선계수를 나타내고 있다. 그림8에서와 같이 R400, R1200의 경우, 원곡선 구간에서 탈선계수가 가장 높게 나타났고, R400의 경우, 완화곡선→원곡선이 원곡선→완화곡선보다 탈선계수가 크게 나타났고, R1200의 경우, 원곡선→완화곡선이 완화곡선→원곡선보다 탈선계수가 크게 나타났다. 그림9와 그림10은 곡선반경 R400, R1200에서 캔트량의 변화에 따른 해석결과로 곡선부 전체 구간의 전두부 좌우측 차륜의 vertical force에 대한 lateral force의 비를 나타내고 있다. 그림9에서와 같이 곡선반경 R400인 경우, 기준 캔트량인 167 mm에서 안전 기준을 초과됨이 나타났고, 과잉캔트가 주행안전성에 악영향을 미침을 확인할 수 있었다. 그림10에서와 같이 곡선반경 R1200인 경우, 캔트부족이 주행안전성에 악영향을 미침을 확인할 수 있었다.

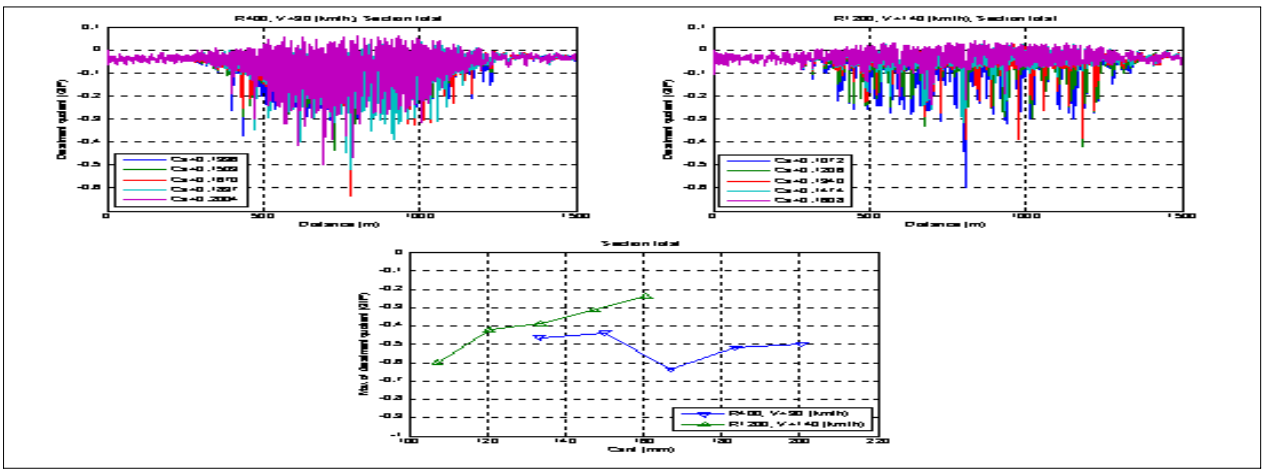


그림5. Full of derailment coefficients depending on cant variations

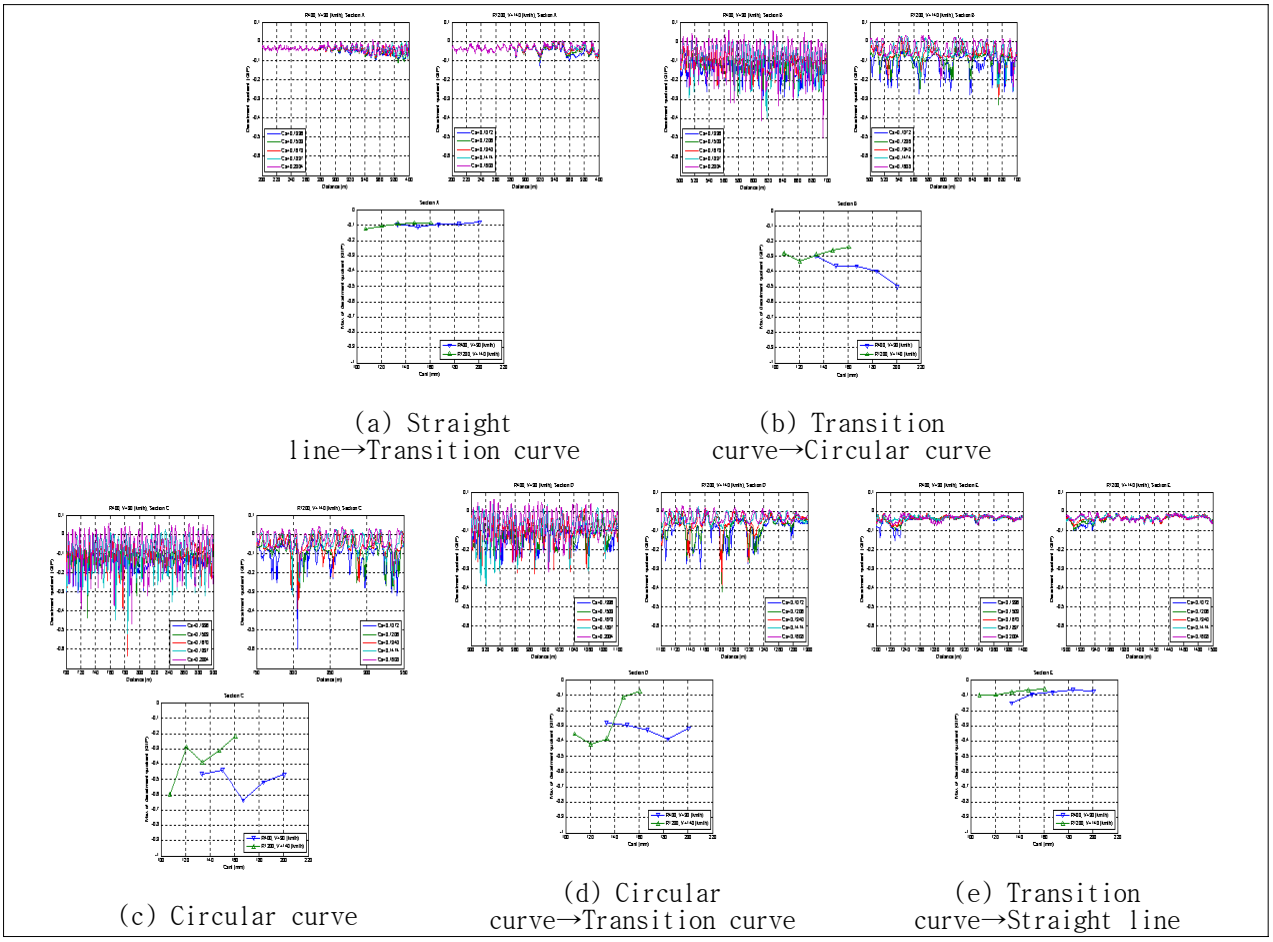


그림8. Section of Derailment coefficients depending on cant variations

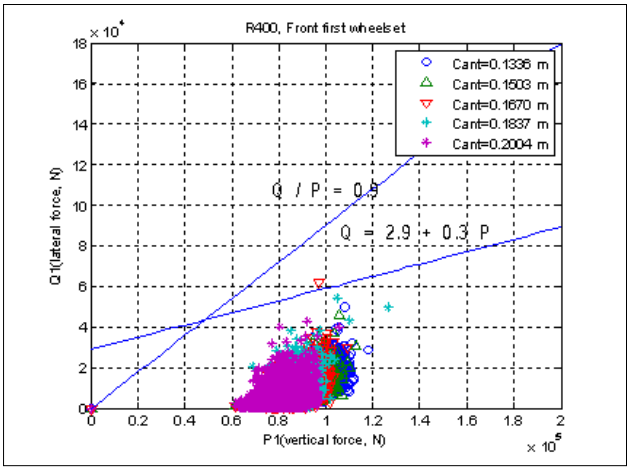


그림9. Vertical force and lateral force of ratio on cant variations(R400)

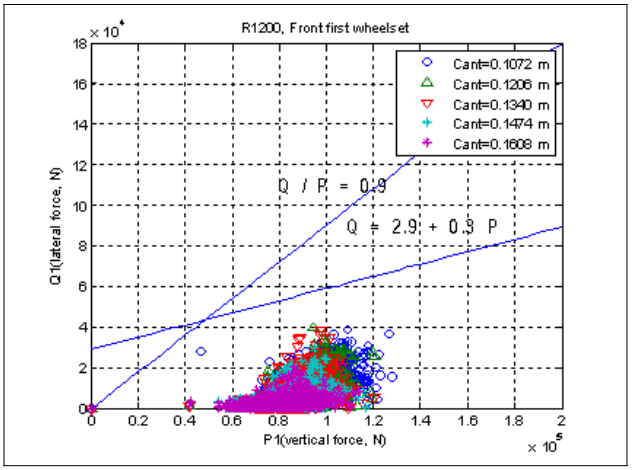


그림10. Vertical force and lateral force of ratio on cant variations(R1200)

(2) 완화곡선길이 변화

완화곡선길이 변화에 따른 차량의 주행안전성 평가를 검토하기 위해 해석을 수행하였다. Fig. 11은 곡선반경 R400 (V=90 km/h), R1200(V=140 km/h), 캔트량(167 mm, 134 mm)에서 완화곡선길이의 변화에 따른 차량에 대한 해석결과로 곡선부 전체 구간의 전두부 좌우측 차륜의 탈선계수를 나타내고 있다. Fig. 11에서와 같이 R400의 경우, 완화곡선길이가 증가에 따라 탈선계수도 증가하였고, 완화곡선길이가 370 mm에서 0.68의 탈선계수가 나타났다. R1200인 경우는 완화곡선길이가 증가에 따라 탈선계수도 증가하였고, 완화곡선길이가 275 mm에서 0.42의 탈선계수도 증가하였다. 이는 완화곡선길이가 임의로 길게 하여도 주행안전성에 악영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 정확한 설계가 요구된다. Fig. 12는 곡선반경 R400, R1200에서 완화곡선길이의 변화에 따른 차량에 대한 해석결과로 곡선부 구간별 전두부 좌우측 차륜의 탈선계수를 나타내고 있다. Fig. 12에서와 같이 R400, R1200의 경우, 원곡선 구간에서 탈선계수가 가장 높게 나타났고, R400의 경우는 완화곡선→원곡선이 원곡선→완화곡선보다 탈선계수가 크게 나타났고, R1200의 경우는 원곡선→완화곡선이 완화곡선→원곡선보다 탈선계수가 크게 나타났다. Fig. 13과 Fig. 14는 곡선반경 R400(cant=167 mm)와 R1200(cant=134 mm)에서에서 완화곡선길이 변화에 따른 해석결과로 곡선부 전체 구간의 전두부 좌우측 차륜의 vertical force에 대한 lateral force의 비를 나타내고 있다. Fig. 13에서와 같이 곡선반경 R400인 경우, 기준 완화곡선길이인 310 mm에서 안전 기준을 초과됨이 나타났고, 완화곡선길이 부족이 주행안전성에 악영향을 미침을 확인할 수 있었다. Fig. 14에서와 같이 곡선반경 R1200인 경우, 완화곡선길이 부족이 주행안전성에 악영향을 미침을 확인할 수 있었다.

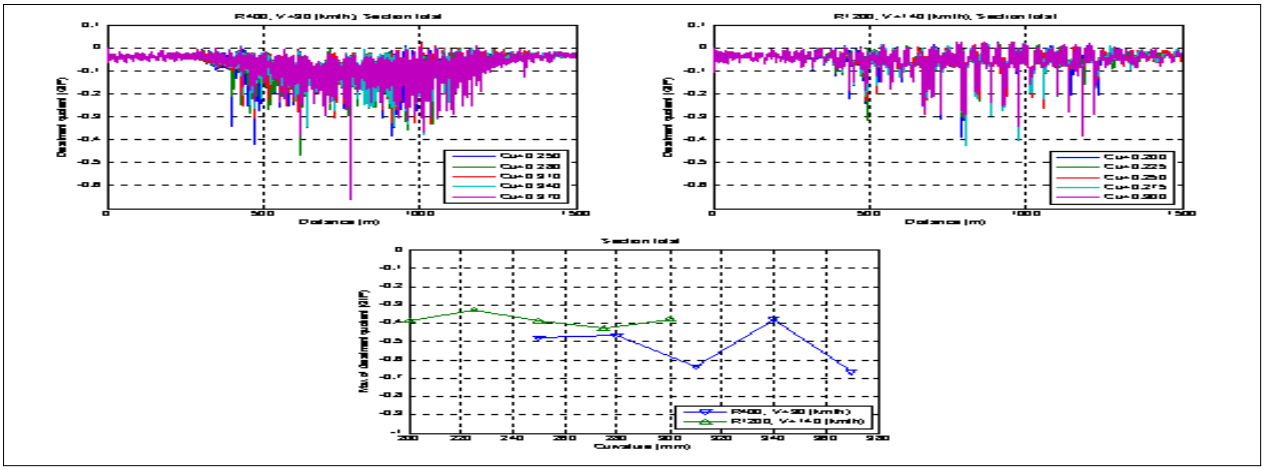


그림11. Full of derailment coefficients depending on curvature variations

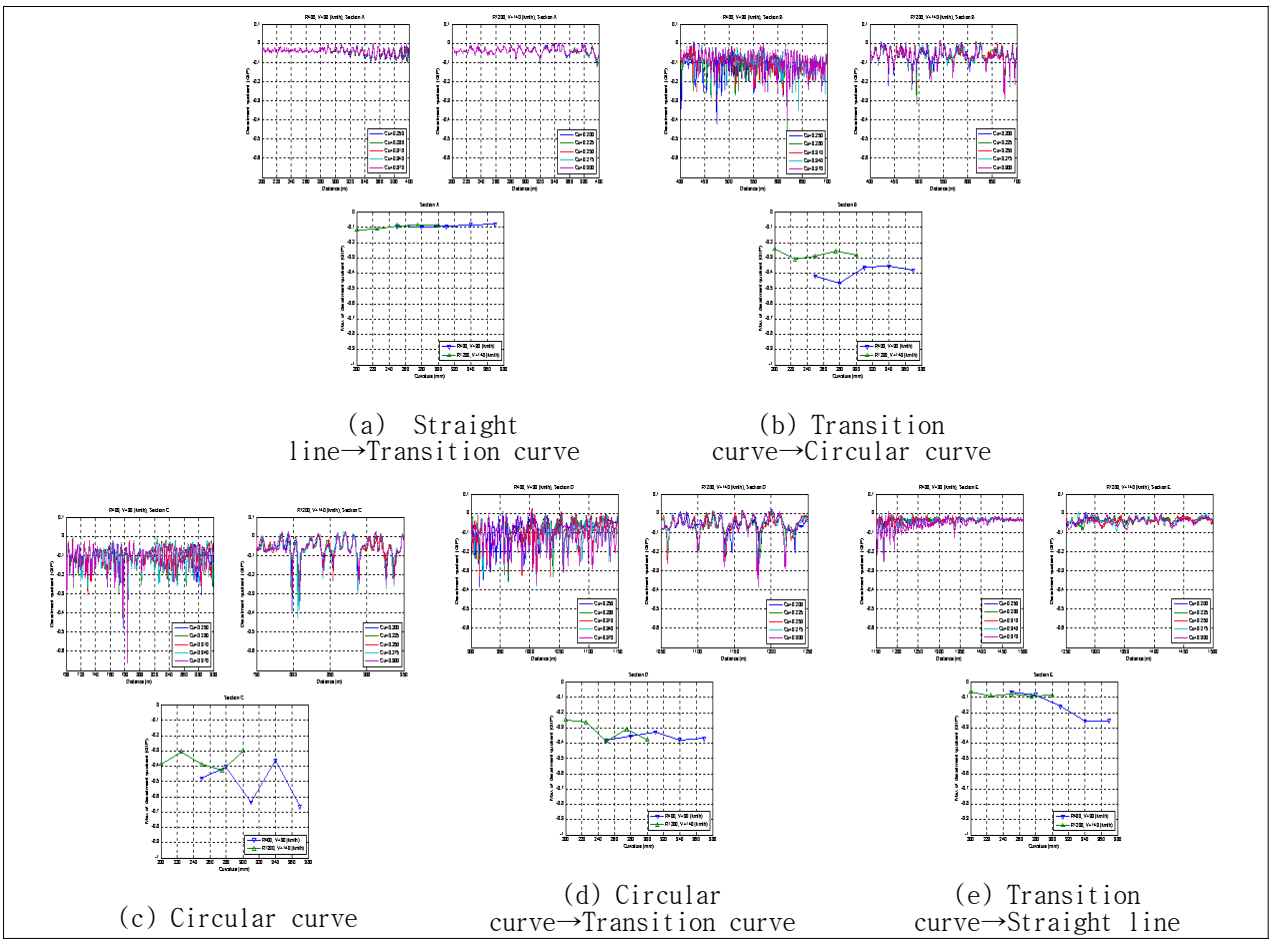


그림12. Section of Derailment coefficients depending on curvature variation

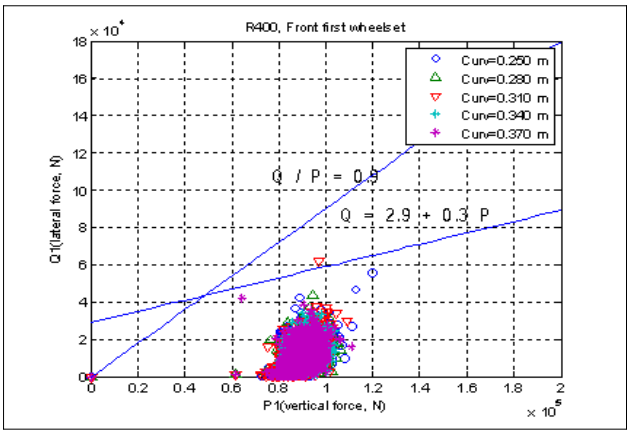


그림13. Vertical force and lateral force of ratio on curvature variations(R400)

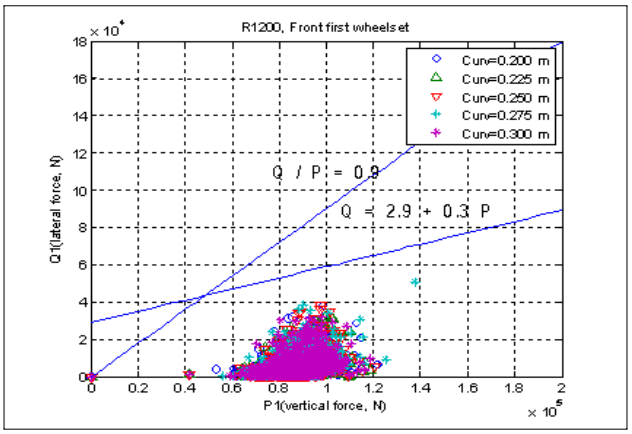


그림14. Vertical force and lateral force of ratio on curvature variations(R1200)

5. 결론

새마을호 열차의 다량편성 해석모델을 이용하여 차량의 곡선부 통과속도를 향상하기 위한 선로조건에 따른 곡선부 구간별 주행안전성 평가 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 캔트량 변화에 따른 차량의 주행안전성은 전체 곡선구간에서 곡선반경이 작은 경우 과잉캔트가 주행안전성에 악 영향을 미치고, 곡선반경이 큰 경우 캔트부족이 주행안전성에 악영향을 미침을 확인할 수 있었고, 곡선부 구간별에서 원곡선 구간이 주행안전성이 가장 나쁘게 나타났다. 완화곡선길이 변화에 따른 차량의 주행안전성은 전체 곡선구간에서 완화곡선길이 부족이 주행안전성에 악영향을 미침을 확인할 수 있었다. 곡선부 구간별에서는 원곡선구간이 주행안전성이 가장 나쁘게 나타났다. 그러므로 캔트, 완화곡선길이 등과 같은 선로조건이 차량의 주행안전성에 악영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 정확한 설계가 요구된다.

참고문헌

1. Park, K. S, Lee, S. I, Lee, H. S (2007), "A Safety Assessment and Vibration Characteristics of Railway Vehicle Passing Curves," Transactions of the korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.17, No.10, pp.993～1001.
2. Lee, J. D (2001), "Railroad engineering," Nohae Press.
3. Se, S. B (2002), "Track engineering," Eul and al Prees
4. Mechanical Dynamics (2005), "ADAMS/RAIL User's Guide,"