현행 철도건설규칙을 고려한 기존선 구간에서의 탈선안전도 해석
An Analysis of Derailment Safety in Conventional Line considering Current Railway Construction Regulations

김용원† 엄범규* 강부병** 이희성***
Young-Won Kim Beom-Gyu Eom Bu-Byoung Kang Hi Sung Lee

ABSTRACT

When a railway vehicle passes through curves & transitions, the running speed must be improved by proposing the standards on the maximum running possibility speed of each section on conventional line (Dongdaegoo-Namsunghyun) considering derailment safety.

In this paper, To improve the maximum running possibility speed of railway vehicle which passes through curves which have high risk of derailment, the track alignment conditions of conventional line (Dongdaegoo-Namsunghyun) that present transition curve length in current railway construction regulations are controlled. We presented elevation way about the section maximum running possibility speed in conventional line by analysis result.

1. 서론

철도차량이 고속으로 주행하게 되면 궤도와의 상호작용에 의해 차륜과 레일에 주어진 힘(윤중, 횡압)이 변동하여 현저하게 윤중과 횡압이 크게 되거나, 또는 윤중이 현저하게 작게 되는 윤중감소가 발생하여 궤도파괴의 증가와 탈선의 위험도 생기는 경우가 있다. 이 윤중과 횡압은 차륜과 레일의 상호작용에 의해 생기는 경우가 있기 때문에 적절한 캔트와 완화곡선을 갖는 궤도구조와 급곡선에서 대차의 회전저항을 작게 하는 등 궤도의 부담력을 경감시키도록 하는 차량구조를 병행하는 것이 속도향상에 필요하다. 곡선부 통과시 에는 원심력의 영향을 받기 때문에 곡선통과 속도는 곡률반경에 의해 제한을 받지만 캔트, 캔트 부족량, 완화곡선길이와의 관계를 적절히 결정하는 것에 의해 주행안전성과 승차감을 악화시키지 않으면서 곡선통과속도를 향상할 여지가 있다.[1]

기존선 속도향상 시에 탈선안전도를 고려한 기존선 구간 (동대구-남성현) 최대 운행가능속도에 대한 기준을 제시하여 기존선의 곡선부 및 완화곡선부 통과 시 속도를 향상시키고자 한다.

이에, 탈선의 위험도가 높은 곡선부를 통과하는 열차의 최대 운행가능속도 향상을 도모하기 위하여 기존 선로조건인 경부 제 1본선인 동대구-남성현 상·하행구간의 선로선형조건을 현행 철도건설규칙에서 제시한 완화곡선 삽입길이를 조정하였다. 곡선별 구간별 통과시 탈선안전도 해석을 철도차량 전용 해석 프로그램인 VI-Rail[2]을 사용하며 수행하였고, 해석결과를 토대로 기존선에서의 구간별 최대 운행가능속도에 대한 향상 방안을 모색하였다.

† 교신저자, 국토해양부 자동차정책과
E-mail : kyw7000@korea.kr
* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과
** 우송대학교
*** 서울과학기술대학교 철도전문대학원, 한국도시철도연구소

2. 현행 철도건설규칙을 고려한 선로선형 설계 검토

새로운 철도건설규칙을 근거로 완화곡선 삽입 길이에 대한 선형설계를 수행하였으며, 또한 제안한 설계변수의 타당성을 검증하였다. 검증은 일반철도 구간 중 2급선에서 임의의 곡선반경으로 수행하였으며 설계속도별 선형변수에 대하여 계산하였다.

2.1. 완화곡선 삽입 길이 한도

2.2.1. 기존 안전한도(L)

① 설정캔트의 1,300배 : $L = 1{,}300 \times \triangle C$

② 차량의 3점 지지 탈선방지를 위한 안전한도(L_1)

- 캔트의 600배 : $L_1 = 0.6 \times \triangle C$

③ 캔트의 시간변화율을 고려한 승차감 한도(L_2)

- 최대캔트변화량 시간변화율 : $L_2 = \dfrac{7.31\,V \triangle C}{1000}$

④ 부족캔트에 의해 열차가 받는 초과 원심력의 시간변화율을 고려한 승차감 한도(L_3)

- 최대부족캔트 변화량 시간변화율 : $L_3 = \dfrac{6.18\,V \triangle C_d}{1000}$

2.2. 일반철도 구간 : 2급선 선로, 곡선반경(R) : 400m

2.2.1. 선형현황

- 설계속도 V =150 km/h(2급선)
- 설정캔트 C=160 mm, 부족캔트 C_d=100 mm 적용
- 완화곡선장 : 208 m(설정캔트 160 mm의 1,300배)

2.2.2. 새로운 철도건설규칙에 의한 선형 관련 적용

① 곡선반경

- 곡선반경 계산식 (도표 1 참고)

도표 1. 곡선반경 계산식 (2급선 선로-R400)

구분	최소 곡선반경	부득이한 경우	적용	비고
곡선 반경	$R \geq \dfrac{11.8\,V_{\max}^2}{C + C_d} = \dfrac{11.8*150^2}{(160+100)} = 1{,}021\,m$	400	1,100	

- **최소 곡선반경 R≥1,021m 이나 부득이한 경우를 고려 곡선반경 R=400 m 적용함.**

② 완화곡선

- 삽입기준 : $R = \dfrac{11.8\,V^2}{\triangle C_{d,\lim}} = \dfrac{11.8*150^2}{57} \fallingdotseq 4{,}657\,m > 400$ 이므로 삽입이 필요함.
- 다음 계산값 중 큰 값 이상
  · 캔트의 600배 : $L_1 = 0.6 \times \triangle C = 0.6 \times 160 = 96\,m$
  · 최대 캔트 변화량 시간변화율 : $L_2 = \dfrac{V}{3.6} \dfrac{\triangle C}{(dC/dt)_{\lim}} = \dfrac{150}{3.6} \dfrac{160}{38} \fallingdotseq 175.4\,m$

· 최대 부족캔트 변화량 시간변화율 : $L_3 = \frac{V}{3.6}\frac{\triangle C_d}{(dC_d/dt)_{\lim}} = \frac{150}{3.6}\frac{57}{45} \fallingdotseq 52.8m$ (도표 2 참고)

∴ 따라서 최대캔트변화량 시간변화율(L_2)에 의해 산출된 175.4m을 적용함.

도표 2. 최대 부족캔트, 캔트 변화량 시간변화율 (2급선 선로-R400)

최대 부족캔트 변화량 시간변화율 (mm/sec) $(dC_d/dt)_{\lim}$	최대 캔트 변화량 시간변화율 (mm/sec) $(dC/dt)_{\lim}$
45	38

• 캔트 체감배수

· 설정캔트 160 mm 일 때, 완화곡선 최대연장 208 m

· 체감배수 M=175.4 m÷160 mm ≒ 1,096배

· 과거 규칙(M=1,300배) 대비 약 15.4%의 연장감소로서, 계산한 체감배수 M 값(1,100 가정) 적용 시 완화곡선의 길이 L=1,100×160 mm = 176m을 적용함.

③ 직선 및 원곡선 최소 길이

• $L = 0.5V_{\max} = 0.5 \times 150 = 75m$(현기준$0.5V_{\max} = 0.5 \times 150 = 75m$) ∴ 과거규칙과 동일

2.2.3. 새로운 철도건설규칙 적용에 따른 통과속도 검토

① 과거 규칙

• 최대 운행가능 속도 $V = \sqrt{\frac{R(C+C_d)}{11.8}} = \sqrt{\frac{400(160+100)}{11.8}} \fallingdotseq 93.9 km/hr$

② 새로운 규칙

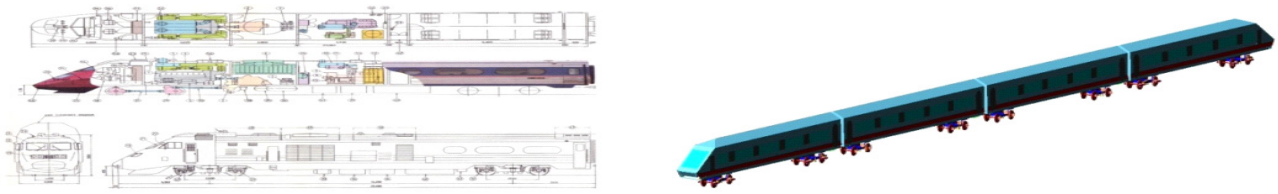
• 최대 운행가능 속도 $V = \sqrt{\frac{R(C+C_d)}{11.8}} = \sqrt{\frac{400(160+100)}{11.8}} \fallingdotseq 93.9 km/hr$

3. 탈선안전도 해석

3.1 해석모델

3.1.1 차량 모델

본 연구에서는 철도차량 동특성 해석을 위하여 상용 소프트웨어인 VI-Rail를 이용하였다. 그림 1는 해석에 사용한 새마을호 차량의 도면과 해석모델을 보여준다. 새마을호 동력차 및 객차의 주요 물성치는 참고문헌[3]에 제시된 자료를 사용하였다.



(a) 설계도면 (b) 3D 모델 (VI-Rail)

그림 1. 해석모델 (새마을호)

3.1.2. 차륜과 레일모델

그림 2~3는 차륜과 레일 모델의 형상을 나타내고 있다. 차륜 모델에는 새마을호 열차에 적용된 차륜 답면구배가 1/40인 KNR 40을, 레일 형상에는 KS 50 레일을 사용하였다.[4]

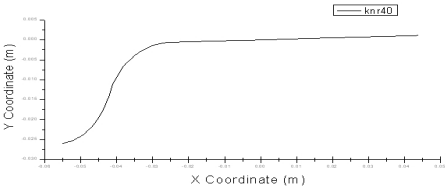


그림 2. 차륜 모델 (KNR40)

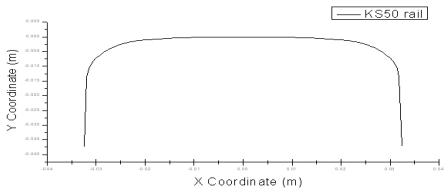
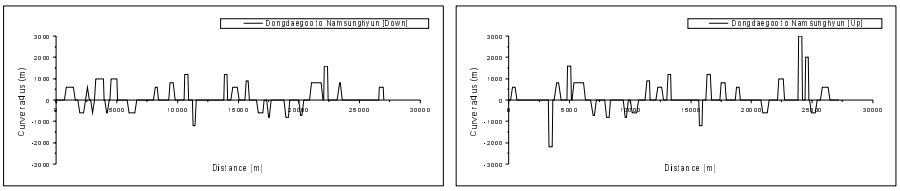


그림 3. 레일 모델 (KS 50)

3.1.3 선로모델

동대구-남성현 구간의 상·하행 구간의 곡선현황은 그림 4와 같고, 한국철도공사 2008년도 대구-청도 경부선 선로 일람약도(대구지사 시설팀)와 경부선 선로데이타를 참고하였다. 또한. 대전 철도차량 정비본부에서 운용 중에 있는 궤도검측차에서 검측한 실제 데이터를 이용하여 VI-Rail에서 요구하는 입력조건으로 변환하여 모델링하여 궤도틀림 데이터를 적용하였다.[1]



(a) 하행 (b) 상행

그림 4. 곡선 현황 (동대구~남성현 구간)

3.2 해석조건

경부 제 1본선인 동대구↔남성현 구간의 선로선형조건을 현행 철도건설규칙에서 제시한 완화곡선 삽입 길이(캔트의 시간변화율을 고려한 승차감 한도 L_2)로 조정하였다. 동대구↔남성현 구간의 선로선형조건과 현행 철도건설규칙에 의한 완화곡선 삽입길이를 나타내고 있다. 탈선 안전도 해석은 동대구↔남성현 구간의 상·하행선을 총 4개 구간(동대구↔고모, 고모↔경산, 경산↔삼성, 삼성↔남성현)으로 나누어서 수행하였다. 구간별로 선형조건 표를 본 논문에서 나타내기에는 자료가 방대하여 상기의 4개 구간 중 동대구↔고모(하행)의 선형조건을 도표 3에 나타내었다.

도표 3. 동대구↔고모 하행 구간의 선로선형 조건과 현행 철도건설규칙에 의한 완화곡선 삽입길이

순번	곡선반경 (m)	곡선길이 (m)		완화곡선길이 (SP-PC) (m)		완화곡선길이 (CP-PS) (m)		직선길이 (m)	캔트 (mm)		속도 (km/h)	
		변경전	변경후	실제선로	현행철도건설규칙(L_2)	실제선로	현행철도건설규칙(L_2)		실제캔트	규헝캔트	최고속도	영업속도
								0.690				
1	600	0.565	0.623	0.150	0.121	0.150	0.121		150	237.97	110	90
								0.210				
2	600	0.330	0.388	0.150	0.121	0.150	0.121		150	237.97	110	90
								0.025				
3	600	0.010	0.064	0.140	0.113	0.140	0.113		140	237.97	110	90
								0.120				
4	600	0.020	0.074	0.140	0.113	0.140	0.113		140	237.97	110	90
								0.030				
5	1000	0.630	0.592	0.080	0.099	0.080	0.099		100	215.06	135	115
								0.070				
6	600	0.040	0.098	0.150	0.121	0.150	0.121		150	237.97	110	90
								0.080				
7	1000	0.460	0.422	0.080	0.099	0.080	0.099		100	215.06	135	115
								0.540				

도표 4는 선로선형 조정에 따른 해석조건을 나타내고 있으며 8번으로 나누어서 해석을 수행하였다.

도표 4. 선로선형 조정에 따른 해석조건

순번	해석조건			비고
	선로	캔트	속도	
Case 1	실제선로	실제캔트	최고속도(열차운전시행세칙)	
Case 2			현행 영업속도	
Case 3		균형캔트	최고속도(열차운전시행세칙)	
Case 4			현행 영업속도	
Case 5	현행철도건설규칙 (L_2)	실제캔트	최고속도(열차운전시행세칙)	
Case 6			현행 영업속도	
Case 7		균형캔트	최고속도(열차운전시행세칙)	
Case 8			현행 영업속도	

3.3 해석결과

3.3.1 동대구→남성현 구간(하행)

그림 5~8은 동대구→남성현 구간(하행)에 대한 탈선안전도 해석 결과치를 나타내고 있다. 그림 5~8에서와 같이 곡선반경 및 궤도 불규칙에 따라 다른 현상이 나타남을 확인할 수 있었고, 경산→삼성 구간(하행) 제외한 구간에서는 대체적으로 현행 철도건설규칙에 의한 완화곡선 삽입길이를 조정한 경우도 대체적으로 탈선계수 및 윤중감소율과 같은 탈선안전도가 양호한 것으로 나타났다. 경산→삼성 구간(하행)에서는 균형캔트의 최고속도와 영업속도 조건에서 탈선계수 한도치인 0.8을 초과하는 현상이 나타났다.

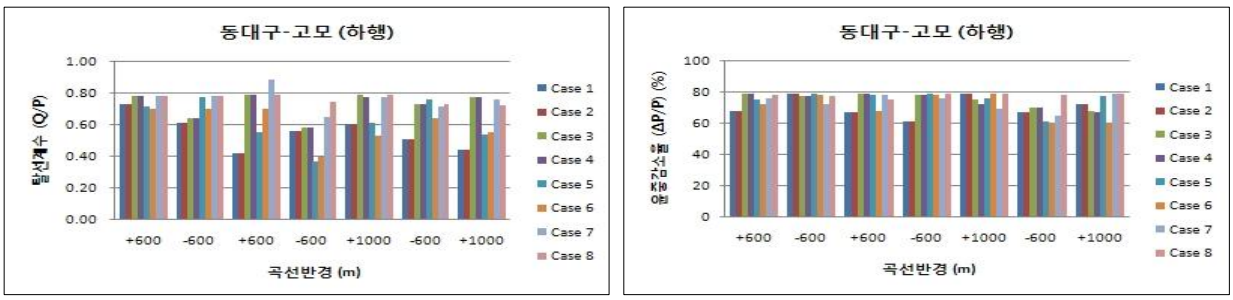


그림 5. 동대구→고모 구간(하행)에 대한 탈선안전도 해석결과

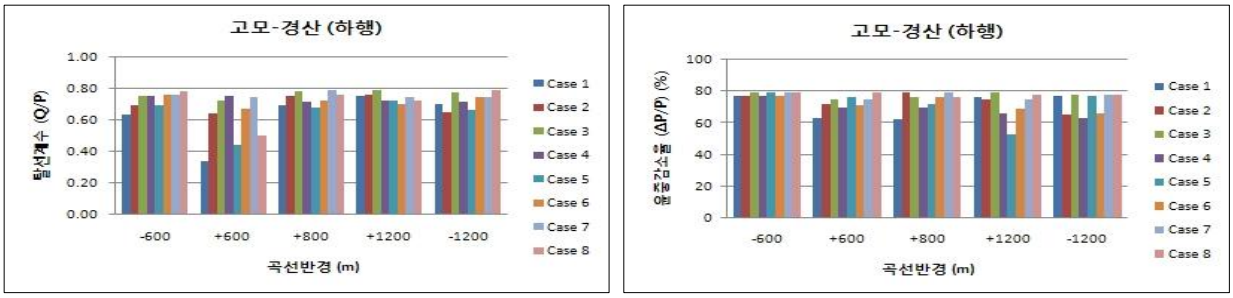


그림 6. 고모→경산 구간(하행)에 대한 탈선안전도 해석결과

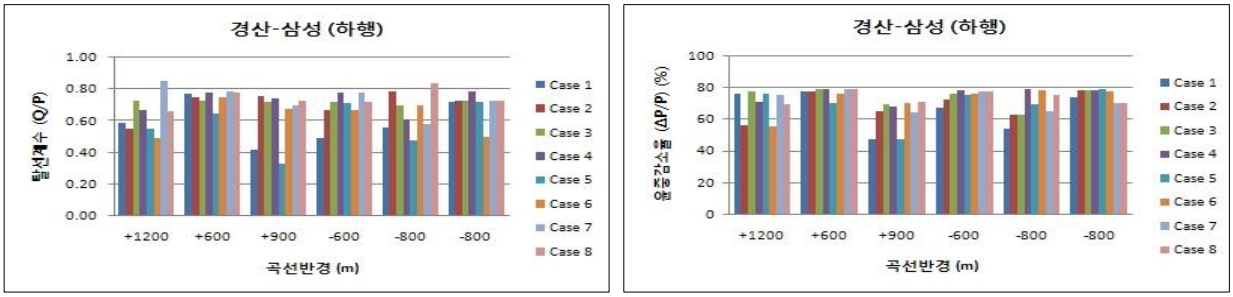


그림 7. 경산→삼성 구간(하행)에 대한 탈선안전도 해석결과

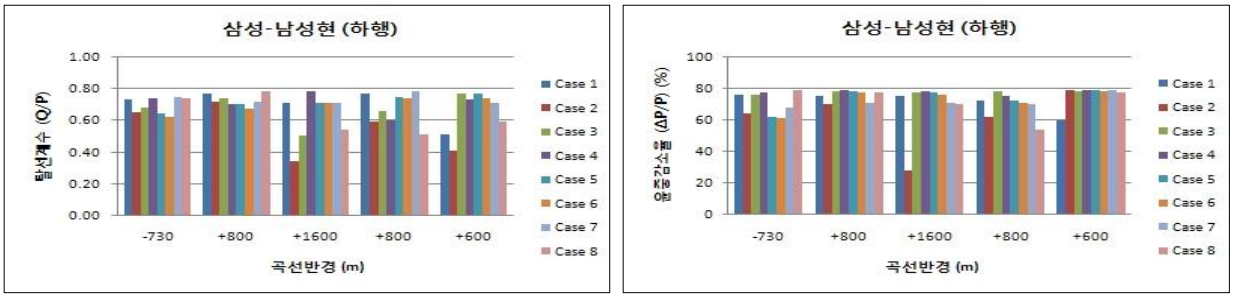


그림 8. 삼성→남성현 구간(하행)에 대한 탈선안전도 해석결과

3.3.2 동대구→남성현 구간(상행)

그림 9~12은 동대구→남성현 구간(상행)에 대한 탈선안전도 해석 결과치를 나타내고 있다. 그림 9~12에서와 같이 곡선반경 및 궤도 불규칙에 따라 다른 현상이 나타남을 확인할 수 있었고, 동대구←고모 구간(상행)을 제외한 구간에서는 대체적으로 현행 철도건설규칙에 의한 완화곡선 삽입길이를 조정한 경우도 대체적으로 탈선계수 및 윤중감소율과 같은 탈선안전도가 양호한 것으로 나타났다. 동대구←고모 구간(상행)에서는 모두 탈선계수 한도치인 0.8를 초과하는 현상이 나타났다. 반면에 윤중감소율은 양호한 것으로 나타났다.

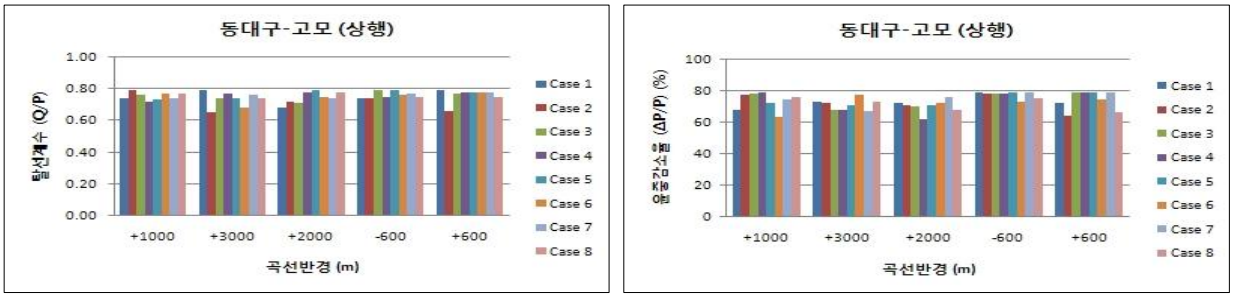


그림 9. 동대구←고모 구간(상행)에 대한 탈선안전도 해석결과

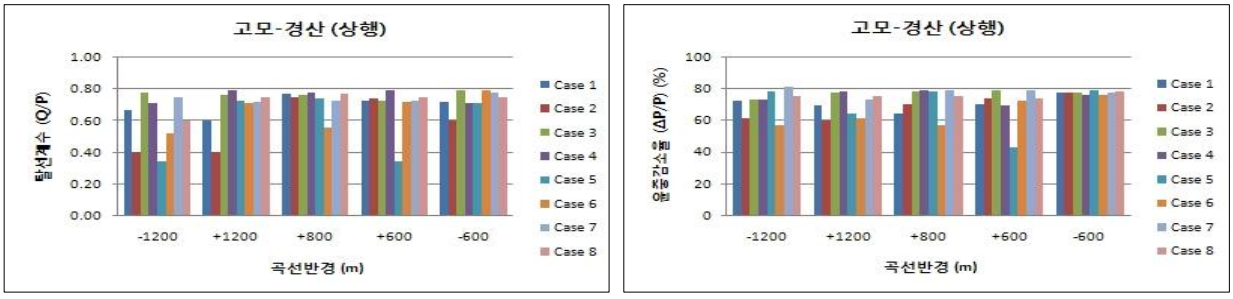


그림 10. 고모←경산 구간(하행)에 대한 탈선안전도 해석결과

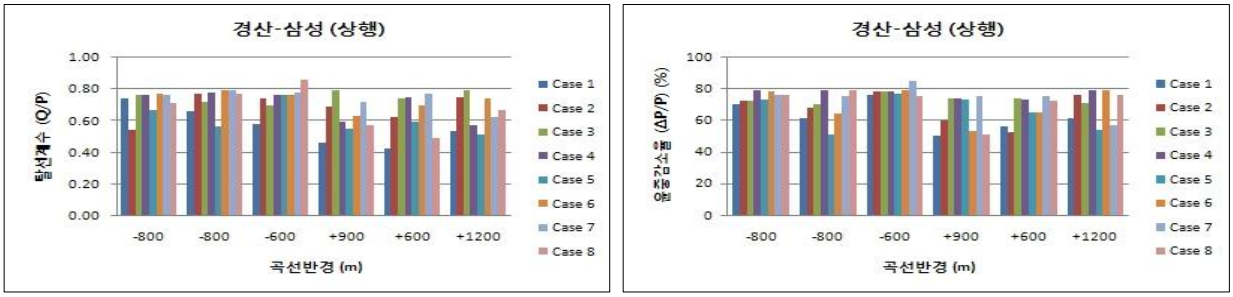


그림. 11. 경산←삼성 구간(상행)에 대한 탈선안전도 해석결과

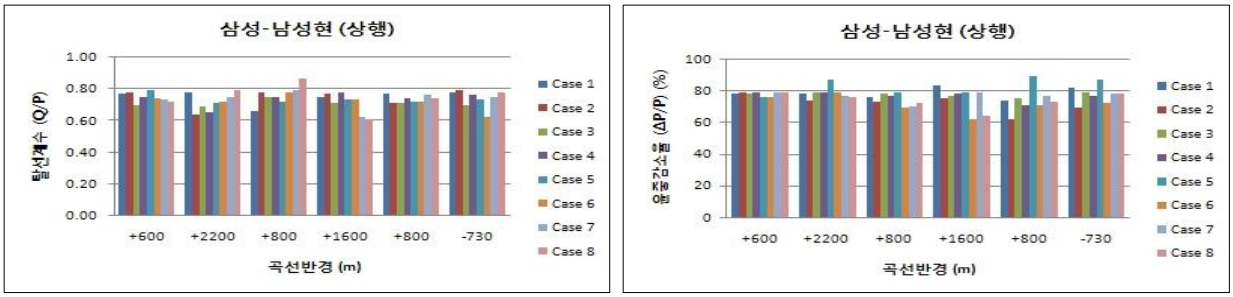


그림 12. 삼성←남성현 구간(상행)에 대한 탈선안전도 해석결과

4. 결론

이에, 탈선의 위험도가 높은 곡선부를 통과하는 열차의 최대 운행가능속도 향상을 도모하기 위하여 기존 선로조건인 경부 제 1본선인 동대구-남성현 상·하행구간의 선로선형조건을 현행 철도건설규칙에서 제시한 완화곡선 삽입길이를 조정하였다. 곡선별 구간별 통과시 탈선안전도 해석을 철도차량 전용 해석 프로그램인 VI-Rail을 사용하며 수행하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 현행 철도건설규칙에서 제시한 완화곡선 삽입 길이(캔트의 시간변화율을 고려한 승차감 한도, L_2) 조정하여 수행한 결과, 구간별 곡선반경에 따른 탈선안전도 해석에서 탈선계수와 윤중감소율이 안전함이 확인되었다.

2. 기존 경부선 동대구→남성현 하행구간에서의 동대구→고모, 고모→경산, 삼성→남성현 구간의 경우, 현행 철도건설규칙에 의한 완화곡선 삽입길이를 조정한 경우도 대체적으로 탈선계수 및 윤중감소율과 같은 탈선안전도가 양호한 것으로 나타났다. 그러나 경산→삼성 구간의 경우, 현행 철도건설규칙에 의한 완화곡선 삽입길이를 조정한 경우, 균형캔트의 최고속도와 영업속도 조건에서 탈선계수 한도치인 0.8을 초과하는 현상이 나타났다.

3. 기존 경부선 동대구←남성현 상행구간에서의 고모←경산, 경산←삼성, 삼성←남성현 구간의 경우, 현행 철도건설규칙에 의한 완화곡선 삽입길이를 조정한 경우도 대체적으로 탈선계수 및 윤중감소율과 같은 탈선안전도가 양호한 것으로 나타났다. 그러나 동대구←고모 구간의 실제선로와 현행 철도건설규칙에 의한 완화곡선 삽입길이를 조정한 경우 모두 탈선계수 한도치인 0.8을 초과하는 현상이 나타났다. 반면에 윤중감소율은 양호한 것으로 나타났다.

4. 완화곡선삽입 길이가 감소해도 탈선안전도가 안전함으로 이에 상응하는 속도향상을 도모할 수 있을 것으로 판단되나 전산해석에 의한 결과이므로 현차 시험을 통한 곡선부 및 완화곡선부 속도향상에 대한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김용원, 엄범규, 강부병, 이희성. “기존선 구간(동대구-남성현)에서의 탈선안전도 해석 연구”, 대한기계학회논문집 A권, 제35권, 제8호, pp. 941~949, 2011.08
2. VI grade, "ADAMS/Rail 2005 R2. 11.0 Documentation", 2008.
3. Eom, B. G., and Lee, H. S., "Assessment of Running Safety of Railway Vehicles using Multibody Dynamics," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, No. 2, pp. 315~320, 2010.
4. 김용원, 이희성, “실제선로 조건에 따른 철도차량의 주행안전성 해석”, 한국철도학회 논문집 제12권 제6호, 2009.12, page 829-1088.