

실제 선로조건에서의 레일 경좌 변화에 따른 철도차량의 주행안전성 해석[§]

김문기* · 엄범규* · 이희성*[†]

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도차량시스템공학과

Running Safety Analysis of Railway Vehicle Depending on Railway Inclination Change Under Actual Track Conditions

Moon Ki Kim^{*}, Beom Gyu Eom^{*} and Hi Sung Lee^{*†}

^{*} Dept. of Rolling Stock System Engineering, Graduate School of Railroad, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,

(Received April 29, 2013 ; Revised September 13, 2013 ; Accepted September 13, 2013)

Key Words: Rail Inclination(레일 경좌), Running Safety(주행안전성), Derailment Coefficient(탈선계수), Wheel unloading Ratio(윤중감소율), Curve(곡선부)

초록: 현재 국내선로에서 운전규정에 따른 곡선반경별 속도제한을 실행하고 있으나 기존선 속도 향상과 관련하여 실제로 탈선 발생 없이 운행 가능한 곡선부 최대 통과속도에 대한 연구가 필요하다. 또한, 철도차량의 주행안전성에 영향을 미치는 요인으로서 차량측면과 궤도측면으로 나뉘질 수 있는데, 본 연구에서는 탈선 안전도 향상에 영향을 미치는 매개변수 중 레일 경좌 변화에 따른 주행안전성을 해석하고자 하였다. 탈선의 위험도가 높은 곡선부 통과하는 열차의 고속향상을 도모하기 위하여 실제 선로조건인 남성현↔청도 상·하행 구간의 곡선부 구간별 통과시 레일 경좌와 주행속도 변화에 따른 주행안전성 해석을 수행하였다.

Abstract: Railways are currently subject to the enforcement of speed limits for each curve as prescribed by the Railway Operating Rules in Korea. However, research is required to determine the maximum speed of trains passing through each curve that allows them to run without the risk of derailment in relation to the speed enhancement of existing railway tracks. In addition, factors affecting the running safety of railway vehicles can be classified into those in terms of vehicle aspects and those in terms of track aspects. This study sought to analyze the running safety of railway vehicles according to changes in the inclination of the rail from among the factors affecting the enhancement of safety against derailment. To increase the speed of trains passing through curves that have high derailment risk, this study also analyzed the running safety of railway vehicles according to the inclination of the rail and changes in running speed while a vehicle passes through each curve section in both the up and the down train line sections between Namsunghyun and Chungdo, which represent the actual conditions of railway tracks.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

현재 국내선로에서 운전규정에 따른 곡선반경별 속도제한을 실행하고 있으나 기존선 속도 향상과 관련하여 실제로 탈선 발생 없이 운행 가능한 곡

선부 최대 통과속도에 대한 연구가 필요하다.⁽¹⁾

또한, 철도차량의 주행안전성에 영향을 미치는 요인으로서 차량측면과 선로측면으로 나뉘질 수 있는데, 본 연구에서는 탈선 안전도 향상에 영향을 미치는 매개변수 중 레일 경좌 변화에 따른 주행안전성을 해석하고자 하였다.

현재 국내에서는 레일 경좌를 고려하여 철도차량의 주행안전성 예측 및 평가에 대한 연구는 매우 기초적인 수준으로 진행되고 있다. 이전 철도선로의 이상적인 기하학적 상태에서 레일 경좌의 영향을 해석적으로 분석한 연구 경험⁽²⁾을 바탕으

§ 이 논문은 대한기계학회 동역학 및 제어부문 2013년도 춘계 학술대회 (2013. 6. 4.-6., ICC 제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, hslee@seoultech.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

로 탈선의 위험도가 높은 곡선부 통과하는 열차의 고속향상을 도모하기 위하여 이상적인 선로조건이 아닌 실제 선로실제 선로조건인 남성현↔청도 상·하행 구간의 곡선부 구간별 통과시 레일 경좌와 주행속도 변화에 따른 주행안전성 해석을 수행하고자 하였다.

2. 주행안전성 평가

2.1 탈선계수(Q/P)

차량이 주행할 때 레일과 차륜은 차량의 정적하중 외에 주행 시의 복잡한 운동으로 차륜은 레일에 수직방향의 힘과 수평방향으로 힘을 작용시킨다. 이 수평방향의 힘(횡압 Q)에 대한 수직방향의 힘(윤중 P)의 비(Q/P)를 탈선계수라 하며, 이 값이 일정치를 넘으면 차륜이 레일을 올라타거나 뛰어 넘어 탈선을 하게 되므로 주행안전성 검토의 기준이 된다.

탈선계수의 해석은 정적해석과 동적해석으로 구별되고 Fig. 1 과 같은 상태에서의 정적해석은 접촉점에서 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 식이 성립되며, 탈선계수의 안전기준은 빈도누적확률로 나타내어 100%일 때 0.8, 0.1%일 때 1.1 이하다.⁽³⁾

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan \alpha \mp (f_y / N)}{1 \pm (f_y / N) \tan \alpha} \quad (1)$$

여기서 P는 윤중(N), Q는 횡압(N), α는 플랜지 접촉각, μ는 마찰계수를 의미한다. 위의 식에서 분자의 -와 분모의 +는 타오르기 탈선, 분자의 +와 분모의 -는 뛰어오르기 탈선을 나타내고, 이것은 차륜이 레일을 미는 힘, 즉 횡압의 작용시간으로 구별하여 1/20 초 이하를 뛰어오르기 탈선, 1/20 초 이상을 타오르기 탈선으로 적용한다.

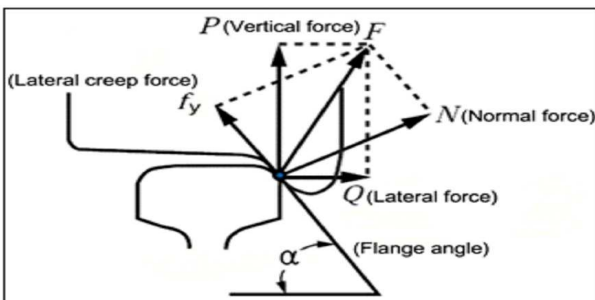


Fig. 1 Interacting force between the wheel and rail

2.2 윤중

2.2.1 정적윤중(P)

차량의 진동에 의한 영향이 없는 경우의 윤중으로 차량의 자중에 따라 그 크기가 결정되며, 윤중의 기본적인 값은 평탄 직선 구간을 5 km/h 정도의 속도로 주행할 때 윤중을 측정하여 수십 개의 평균치를 구한 것으로 한다. 이것은 탈선계수 측정용 윤중의 교정값을 검증할 수 있도록 정확히 구하여야 한다.

2.2.2 윤중감소율(ΔP/P)

차량의 진동이나 중심의 편기, 궤도 및 차량의 평면성 틀림, 곡선에서의 캔트 및 원심력, 풍압 등에 의해 윤중의 감소가 발생한다. 이 때 윤중 감소치(ΔP)에 대한 정적인 윤중(P)의 비를 윤중감소율이라 하며 이 값이 허용한도를 초과하면 탈선의 위험이 있다. 윤중감소율의 기준은 정적인 윤중감소의 경우 ΔP/P ≤ 0.6 이고, 동적인 윤중감소는 빈도누적확률로 100%일 때 0.6, 0.1%일 때 0.8 이하다.⁽³⁾

2.3 횡압(Q)

정적인 윤중이 차량의 자중만큼만 검출된다면 횡압은 0 이라고 볼 수 있다. 그러나 차량이 주행하게 되면 윤중감소가 발생하고 아울러 차륜 플랜지와 레일의 접촉으로 횡방향 하중이 발생하는데 이것을 횡압(Q)이라고 부른다. 어떠한 경우에도 횡압이 윤중보다 커지게 되면 탈선의 위험성은 그만큼 높아지는 것이다.⁽³⁾

3. 레일 경좌

탈선에 영향을 미치는 매개변수⁽⁴⁾에는 대표적으로 선로측면에서 곡선반경, 완화곡선, 캔트, 궤도 틀림(궤간틀림, 수평틀림, 면틀림, 줄틀림, 평면성틀림), 레일 경좌 등으로 나뉘질 수 있는데, 본 연구에서는 레일 경좌 변화에 따른 주행안전성 해석을 수행하고자 하였다

차륜과 레일사이의 접촉조건에서는 접촉점에서 접촉하중들은 레일 면 내측으로 작용한다. 이것은 레일의 설계와 정비에 있어 다양한 문제를 발생시킬 수 있으므로 레일은 차륜과 레일의 접촉 기하적인 특성과 동특성을 고려하여 차륜의 경사각과 설계요구에 따라 다양한 각으로 내측으로 기울어져 있다. 이것을 레일 경좌라 하며 Fig. 2 와 같다.⁽⁵⁾

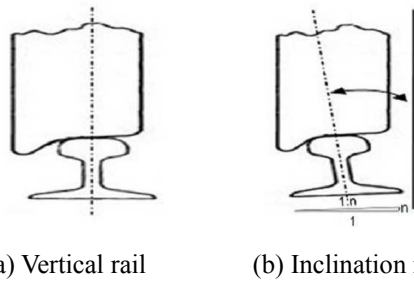


Fig. 2 Effect of rail inclination on wheel-rail contact

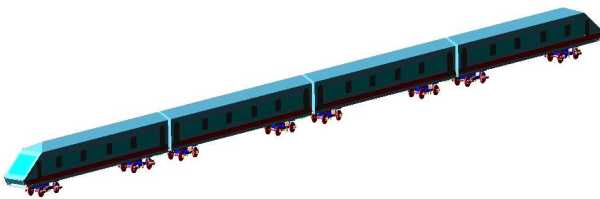


Fig. 3 Analysis model of Saemaul-ho

레일이 설치된 지역에 경좌를 부설하기 위해서는 침목 레일 부설위치를 기울이거나 기울어지는 플레이트를 가진 침목판을 사용한다. 이 방법은 현재 모든 철도에서 사용되고, 나무 및 콘크리트 침목에서 사용된다. 전형적인 방법에서는 레일은 1:20 사이와 1:40의 경사로 궤간 측 내측으로 기울어져 있으며 이것은 레일의 두부 중심에 차륜과 레일의 수직접촉의 점을 유지시키기 위한 것이다.

레일 경좌가 1:20에서 1:40의 경우 레일의 중심선에 가까운 좌우-상하 하중 비율이 감소되는 현상이 일어나며 이로 인하여 침목판에 평형 힘이 발생된다. 또한, 목침목에서의 레일 경좌가 외측으로 기울어진 경우, 침목판이 잘라지거나, 틀어지는 현상이 발생하게 되는데, 이것은 궤간 확대의 탈선과 레일 전복에 원인이 된다

4. 주행안전성 해석

4.1 해석모델

4.1.1 차량모델

본 연구에서는 철도차량 전용해석 프로그램인 VI-Rail를 이용하였으며, 차량모델에 대한 해석모델은 차체, 전대차, 후대차를 하나의 템플릿(Template)으로 각각 모델링하고, 서브시스템(Subsystem)을 생성하고, 이들을 이용하여 최종적으로 조립체를 생성한다.⁽⁶⁾

Fig. 3은 해석에 사용한 새마을호 차량(4량 편성)의 해석모델을 보여주고 있다. 본 논문에서는 새마을호 동력차, 객차의 주요 물성치는 Table 1과

Table 1 Specification data of Saemaul-ho power car

Index	Parameter	Units	Value
Carbody	Length	m	23.56
	Mass of empty car	ton	54.97
	Rolling moment of inertia	Mg· m ²	114.72
	Pitching moment of inertia	Mg· m ²	1551.0
	Yawing moment of inertia	Mg· m ²	1525.0
	Height of center of gravity above the rail	m	1.414
Bogie frame	Bogie frame mass	ton	3.5
	Rolling moment of inertia	Mg· m ²	1.58
	Pitching moment of inertia	Mg· m ²	1.6
	Yawing moment of inertia	Mg· m ²	3.01
	Height of center of gravity above the rail	m	0.52
Axle	Axle mass	ton	2.65
	Rolling moment of inertia	Mg· m ²	1.36
	Pitching moment of inertia	Mg· m ²	1.36
	Yawing moment of inertia	Mg· m ²	0.003
	Wheel diameter	m	0.43
Dimension	Distance between bogie centers	m	15.2
	Distance between axles	m	2.5
	Distance between first suspensions	m	0.5
	Distance between second 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

참고문헌(1)에 제시된 자료를 사용하였다.

4.1.2 차륜/레일 모델

Fig. 4~5는 차륜과 레일 모델의 형상을 나타내고 있다. 차륜 모델에는 새마을호 열차에 적용된 차륜단면구배가 1/40인 KNR 40을, 레일 형상에는

남성현-청도 구간에 사용되고 있는 KS 50, KS 60 레일을 사용하였다.

4.1.3 선로모델

본 주행안전성 해석시 남성현↔청도 구간(기존 경부선)의 선로조건은 2008 년도 대구~청도 경부선 선로 일람약도(대구지사 시설팀)를 통해서 확인할 수 있으며 관련 곡선현황은 Fig. 6 과 같다.

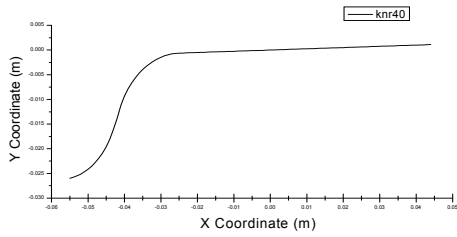
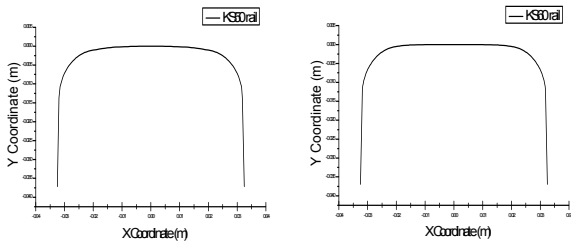
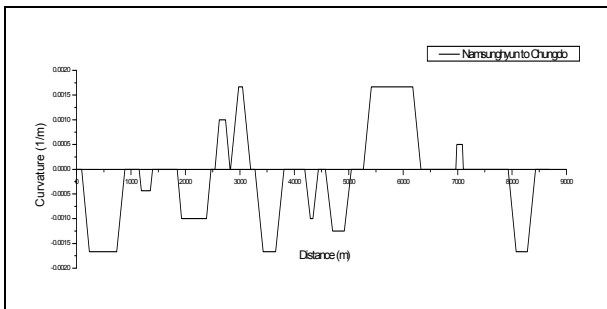


Fig. 4 Wheel model (KNR 40)

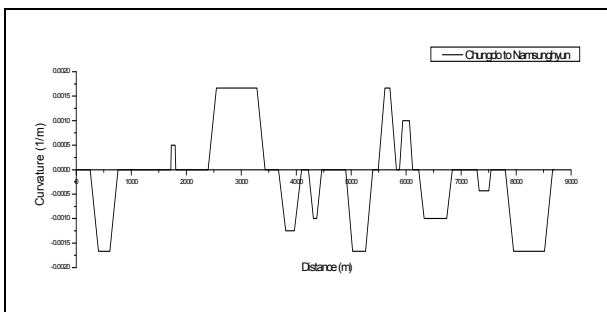


(a) KS 50 (b) KS 60

Fig. 5 Rail model



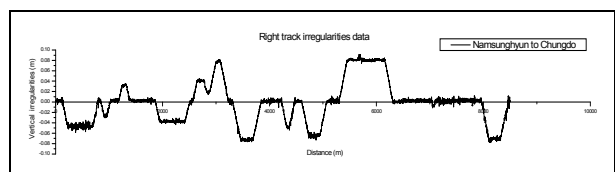
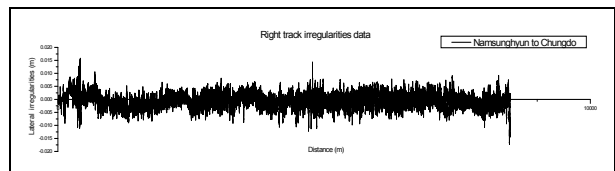
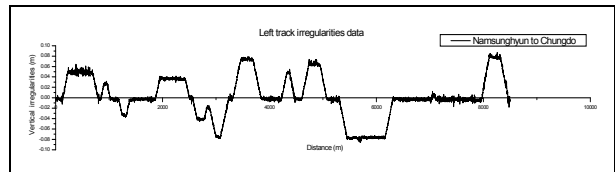
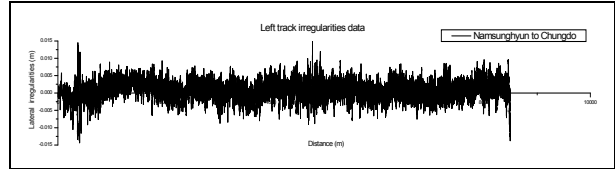
(a) Down



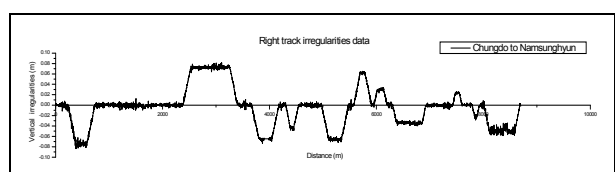
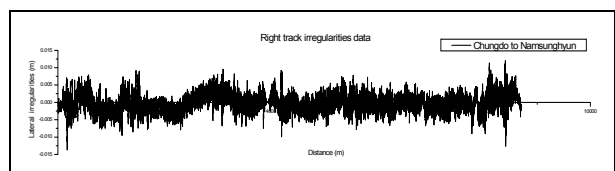
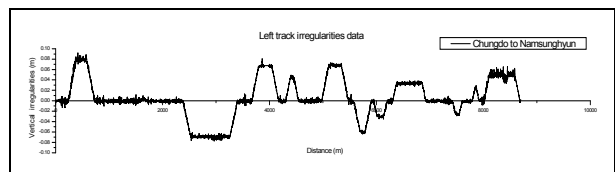
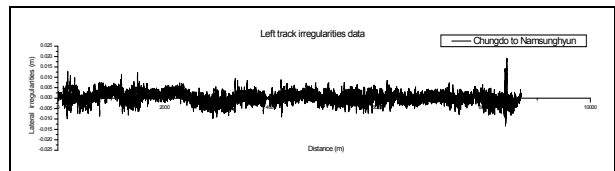
(b) Up

Fig. 6 Curve status of Namsunghyunn↔Chungdo section

또한, 남성현↔청도 구간(기존 경부선)의 레도틀림 데이터는 VI-Rail 에서 Fig. 7 과 같이 레일의 좌우, 상하 레도틀림을 사용하였다.



(a) Down



(b) Up

Fig. 7 Track irregularity of Namsunghyunn↔Chungdo section

4.2 해석조건

본 주행안전성 해석에서는 먼저, 곡선부에서의 속도제한을 확인하였으며 해당하는 속도제한과 선로조건을 기준으로 실제 운행 중인 새마을호에 대하여 레일 경좌 변화(1/20, 1/30, 1/40) 및 곡선통과 속도 변화(기존 속도제한의 -10%, +0%, +10%)에 따른 주행안전성 해석을 수행하였으며 해석조건은 Table 2 와 같다. 참고로 기존선 주행시 곡선부 속도제한의 한국철도공사 열차운전시행세칙에서 관련 자료를 사용하였다.

Table 2 Analysis conditions

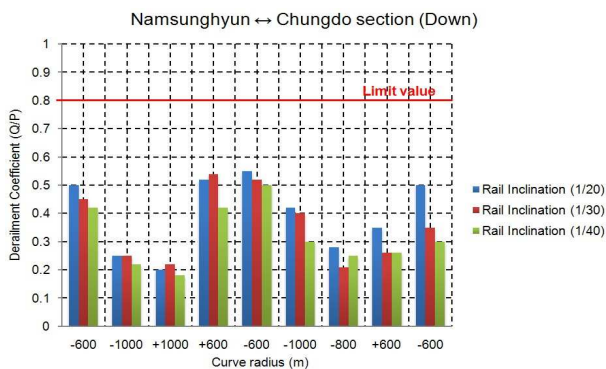
Index	Conditions		Remarks
	Rail inclination	Running speed	
Case 1	1/20	Existing speed (Origin)	Rail inclination change
	1/30		
	1/40		
Case 2	1/40	Origin-10%	Running speed change
		Origin	
		Origin+10%	

또한, 탈선안전도 평가는 UIC 518 규정⁷⁾을 사용하였다. UIC 518 규정은 국제적인 운행허가 목적으로 안전, 궤도피로, 주행거동의 관점과 관련된 동역학적 거동의 관점에서 철도차량 (기존 차량, 신기술 차량과 특수 차량)에 대한 승인절차로서의 노선 주행시험 및 분석방법을 다루고 있다. 이 규정은 국제적인 허가에 대한 최소 필요조건으로 운행되는 지역에서 만날 수 있는 특정한 심각한 운행 조건을 포함하지는 않는다. 측정하거나 계산된 입력값에서 횡압력 합, 탈선계수, 수직하중, 차체 가속도의 평가인자들을 계산하기 위하여 해당 규정에서 정하는 바에 따라 신호처리와 통계처리를 하였다.

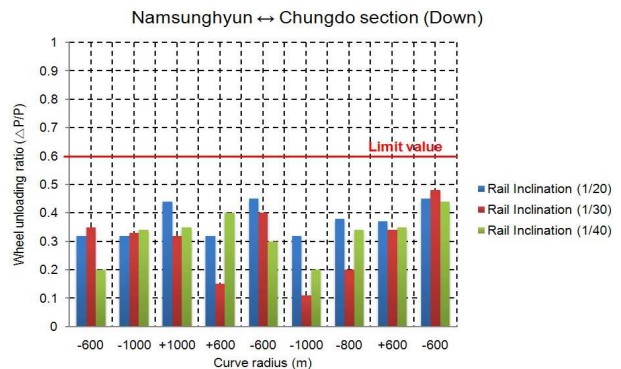
4.3 해석결과

4.3.1 레일 경좌 변화

Fig. 8-9 는 남성현-청도 상· 하행구간 내 곡선부에서의 현 새마을호 주행속도 조건으로 레일 경좌 변화(1/20, 1/30, 1/40) 의 따른 주행안전성 해석결과를 UIC 518 규정에 의해 통계 처리 후 관련 값을 나타내고 있다.

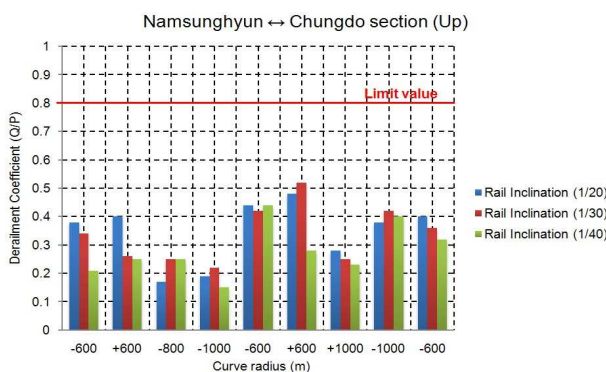


(a) Derailment coefficient

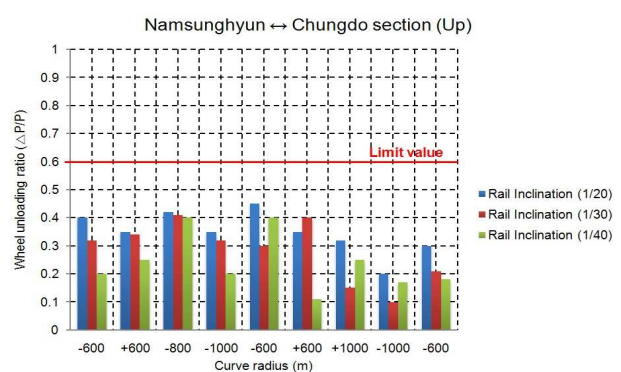


(b) Wheel unloading ratio

Fig. 8 Running safety results of Namsunghyunn↔Chungdo (down) depending on rail inclination change



(a) Derailment coefficient



(b) Wheel unloading ratio

Fig. 9 Running safety results of Namsunghyunn↔Chungdo (Up) depending on rail inclination change

탈선계수와 윤중감소율 모두, 레일 경좌가 1/20 → 1/40 순으로 관련 값들이 적게 나타나는 경향을 확인할 수 있었으며 레일 경좌가 1/40 일 경우, 다른 조건보다 주행안전성 측면에서 안전하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 전반적으로 탈선계수는 한계치인 0.8 보다 작게, 윤중감소율은 한계치인 0.6 보다 작게 나와 안전함을 확인할 수 있었다.

또한 상기에 언급된 평가지수들은 기존선에서의 R600 구간이 다른 구간보다 전반적으로 관련값들이 크게 나타났고 궤도조건인 곡선반경에 크게 영향을 받은 것을 확인하였다.

상기의 해석결과를 종합적으로 검토한 결과, 현재 국내의 기존 경부선에는 레일 경좌가 1/40 으로 부설되어 있고 주행시 안전하다라는 참고문헌 [8]의 결론과 비교해 볼 때, 본 연구인 실제 선로조건에서의 주행안전성 해석을 통하여 같은 결론을 해석적으로 재확인하였다.

4.3.2 주행속도 변화

Fig. 10~11 은 남성현-청도 상· 하행구간 내 곡선

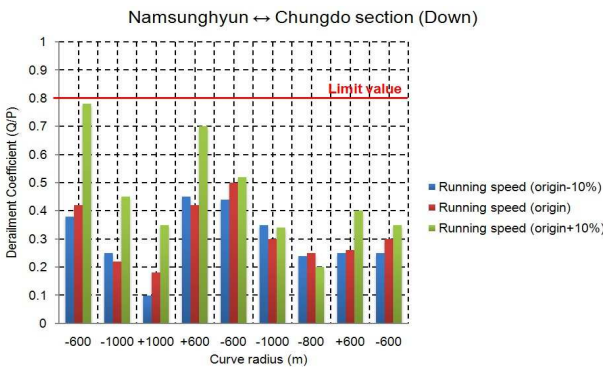
부에서의 상기의 레일 경좌 변화 해석결과에서 언급된 레일 경좌 1/40 의 조건으로 주행속도 변화 (기존 속도제한의 -10%, +0%, +10%)의 따른 주행안전성 해석결과를 UIC 518 규정에 의해 통계 처리 후 관련 값을 나타내고 있다.

탈선계수와 윤중감소율 모두, 주행속도가 향상될수록 관련 값들이 크게 나타나는 경향을 확인할 수 있었으며, 또한, 기존주행속도의 +10 의 향상시에도 전반적으로 탈선계수는 한계치인 0.8 보다 작게, 윤중감소율은 한계치인 0.6 보다 작게 나와 안전함을 확인할 수 있었다.

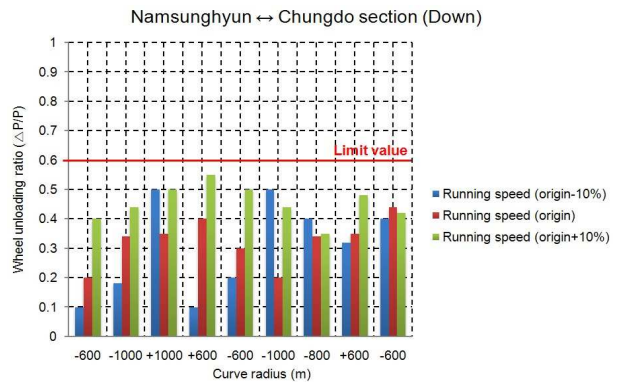
이는 레일 경좌가 1/40 일 경우, 기존선 주행시 속도향상의 10%으로 하여도, 주행안전성 측면에서 안전하다는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 탈선의 위험도가 높은 곡선부 통과하는 열차의 고속향상을 도모하기 위하여 실제 선로실제 선로조건인 남성현↔청도 상· 하행 구간

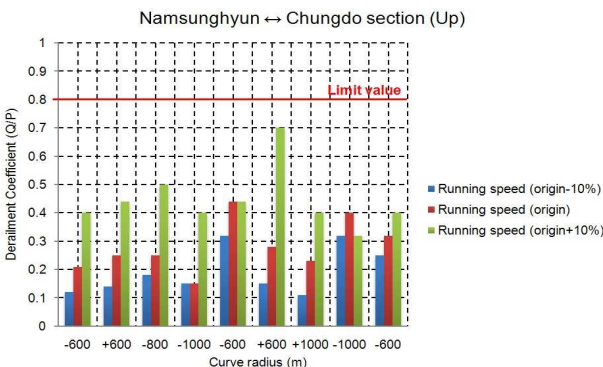


(a) Derailment coefficient

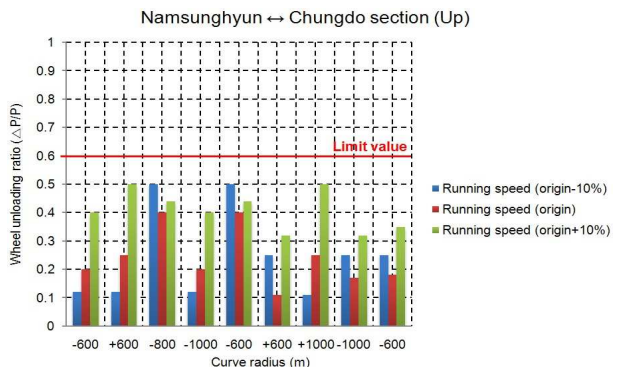


(b) Wheel unloading ratio

Fig. 10 Running safety results of Namsunghyunn↔Chungdo (down) depending on running speed change



(a) Derailment coefficient



(b) Wheel unloading ratio

Fig. 11 Running safety results of Namsunghyunn↔Chungdo (Up) depending on running speed change

의 곡선부 구간별 통과시 레일 경좌와 주행속도 변화에 따른 주행안전성 해석을 수행하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 레일 경좌 변화에 따른 주행안전성 해석결과, 레일 경좌가 1/40 일 경우, 다른 레일 경좌의 조건보다 주행안전성 측면에서 안전하다는 것을 확인할 수 있었다. 전반적으로 탈선계수는 한계치인 0.8 보다 작게, 윤중감소율은 한계치인 0.6 보다 작게 나와 안전함을 확인할 수 있었다

(2) 현재, 국내의 기존 경부선에는 레일 경좌가 1/40 으로 부설되어 있으며, 기존선 주행시에는 주행시 안전하다는 것을 해석적으로 검토하였다.

(3) 주행속도 변화에 따른 주행안전성 해석결과, 주행속도가 향상될수록 관련 값들이 크게 나타나는 경향을 확인할 수 있었고, 레일 경좌가 1/40 일 경우, 기존시 주행시 속도향상의 10%으로 하여도, 주행안전성 측면에서 안전하다는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 향후, 레일 경좌 변화에 따른 주행안전성 해석결과의 검증증을 위하여 현장실차시험을 수행하고, 그 결과를 비교 및 검토하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Kim, Y. W. and Lee, H. S., 2009, "An Analysis of Running Safety for Railway Vehicle Depending on Actual Track Conditions," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 12, No. 6, pp. 983~988.
- (2) Kim, M. K., Eom, B. G., Lee, H. S., "Running Safety Analysis of Railway Vehicle Passing Through Curve Depending on Rail Inclination Change," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 23, No. 3, pp. 199~208.
- (3) Kim, Y. W., Eom, B. G., Kang, B. B. and Lee, H. S., 2011, "Study on Derailment Safety Analysis in a Conventional Line (Dongdaegoo-Namsunghyun)," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 8, pp. 941~949.
- (4) Hwang, J. T. and Lee, H. S., 2007, "A Study on the Parameters to Enhance Derailment Safety," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 5, pp. 626~631.
- (5) J, Sadeghi., M, Fathali., and N, Boloukian., 2009, "Development of a New Track Geometry Assessment Technique Incorporating Rail Cant Factor," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 223, No. 3, pp. 255~263.
- (6) VI grade, ADAMS/Rail 2005 R2. 11.0 Documentation, 2008.
- (7) UIC code 518, 2003, Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of View of Their Dynamic Behavior-Safety-Track Fatigue-Ride Quality.
- (8) Kim, Y. W., "A Study on the Running Safety of Railway Vehicle Passing Through Curve on Conventional Railroad," A Thesis for a Doctorate, *Seoul National Univ. of Science and Technology*, 2013.
- (9) Eom, B. G. and Lee, H. S., 2010, "Assessment of Running Safety of Railway Vehicles using multibody Dynamics," *International Journal of Precision Engineering and manufacturing*, Vol. 11, No. 2, pp. 315~320.
- (10) Eom, B. G., Kang, B. B., Lee, H. S., 2013, "A Study on Running Stability Assessment Methods for 1/5 Small Scaled Bogie of Saemaul using Small-Scaled Derailment Simulator," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 4, pp. 589~598.
- (11) Son, M. S., Eom, B. G., Lee, H. S., 2011, "The Derailment Safety Estimation of DMT Freight for Real Track Condition," *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol 21, No 7, pp. 637~642.