

3호선 실제선로 조건에서의 레일경좌 변화에 따른 철도차량 주행안전성 해석

김태건 · 이희성[†]

서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과
(2014. 11. 1. 접수 / 2015. 1. 11. 수정 / 2016. 6. 13. 채택)

Running Safety Analysis of Railway Vehicle depending on Rail Inclination Change on Actual Track of Subway Line No.3 in Seoul

Tae Geon Kim · Hi Sung Lee[†]

Dept. of Rolling Stock System Engineering, Seoul National University of Science & Technology
(Received November 1, 2014 / Revised January 11, 2015 / Accepted June 13, 2016)

Abstract : It is very hard to analyze the train derailment safety quantitatively at the curved section because of the diversified affect parameters including the complex interaction between wheel and rail, the train conditions such as the shape of wheel, suspension system, the track conditions such as the radius of curve, cant, transition curve, and the operation conditions, etc. Two major factors related to the running safety of railway vehicle are classified as the railway vehicle and the track condition. In this study, when the railway vehicle passing through curves of actual track condition of subway line NO.3 in seoul (Yeonsinnae↔Gupabal), the effect that has influence on running safety depending on rail inclination. The analysis result of 1/40 rail inclination condition is more favorable on running safety than other rail inclination conditions because derailment coefficient and wheel unloading ratio are the lowest.

Key Words : running safety, railway vehicle, rail inclination, derailment

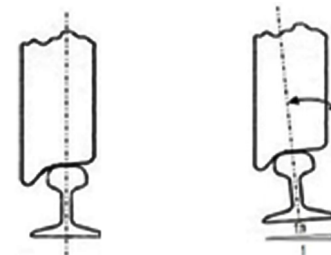
1. 서론

철도차량의 주행안전성은 차량측면과 궤도측면 및 운전측면 등 매우 다양한 요인에 영향을 받는다. 또한, 차륜과 레일의 접촉부에서 실제 주행 중에 발생하는 상호작용은 실시간으로 매우 복잡하게 이루어지며, 차량, 선로 및 운전조건 간의 다양한 영향으로 인해 열차의 탈선 안전도를 정량적으로 평가하는 데는 매우 복잡한 과정이 필요하다.

현재 국내선로에서는 운전규정에 따라 정해진 구간별 속도제한을 시행하고 있으나 실제로 탈선 발생 없이 운행 가능한 주행안전성에 대한 연구가 필요하다.

또한 주행안전성에 영향을 미치는 여러 요인 중 궤도부설 시, 레일경좌라는 기하학적 매개변수를 무시하면 철도차량의 주행안전에 문제를 일으킬 수 있기 때문에 선로의 기하학적 구조를 적합한 형태로 유지하고 탈선안전도에 최적인 레일경좌를 결정하는 것이 주행

안전성 연구에 필수적이다. 차륜과 레일 사이의 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 레일경좌(Rail inclination)라 하며 Fig. 1과 같다.



(a) Vertical rail

(b) Inclination rail

Fig. 1. Effect of rail inclination on wheel-rail contact.

[†] Corresponding Author : Hi Sung Lee, Tel : +82-2-970-6877, E-mail : hslee@seoultech.ac.kr

Dept. of Rolling Stock System Engineering, Seoul National University of Science & Technology, 232, Gongrueng-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

본 연구에서는 탈선 안전도에 영향을 미치는 매개변수 중 레일경좌 변화에 따른 주행안전성을 해석하고자 하였다.

2. 주행안전성 평가 이론 및 방법

2.1 탈선계수

차량이 주행할 때 레일과 차륜은 차량의 정적 하중 외에 주행 시의 복잡한 운동으로 차륜은 레일에 수직 방향의 힘과 수평방향으로 힘을 작용시킨다. 이 수평 방향의 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. 2와 같은 상태에서의 정적해석은 접촉점에서 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 식이 성립되며, 탈선계수의 평가기준은 측정 전 구간을 차륜 1회전마다 탈선계수의 최대치를 구하고 그 최대치를 0.05 단위로 구분하여 빈도누적확률로 나타내어 기준에 적용한다. 이때 허용한도는 기본적으로 0.8 이하이며, 추가적으로 빈도누적확률(누적분포확률)로 나타내어 100%일 때 0.8, 0.1%일 때 1.1 이하이다¹⁾.

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

여기서 P는 윤중(N), Q는 횡압(N), α는 플랜지 접촉각, μ는 마찰계수를 의미한다.

2.2 윤중감소율

차량의 진동이나 중심의 편기, 궤도 및 차량의 평면

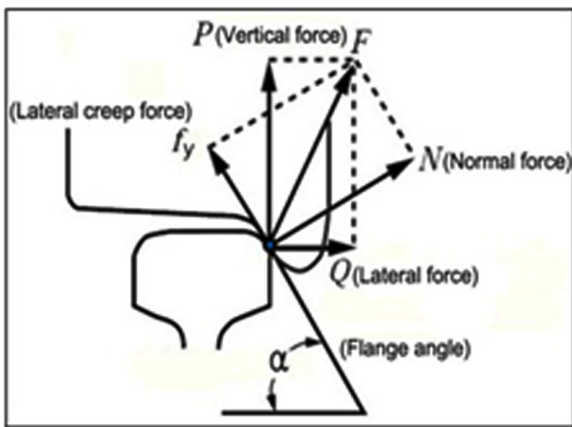


Fig. 2. Interacting force between the wheel and rail.

성 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. 공차중량상태의 정적인 윤중감소량은 동일 차축에서 양쪽 차륜 평균치의 최대 60%까지 허용된다. 동적인 윤중감소량은 측정 전 구간을 차륜 1회전마다 최소윤중(Pmin)을 읽고 윤중감소비를 계산하여 10% 단위로 나누어 빈도누적확률로 나타내어 기준에 적용한다. 이때 허용한도는 빈도누적확률(누적분포확률)로 100%일 때 0.6, 0.1%일 때 0.8 이하를 기준으로 평가한다¹⁾.

3. 해석모델

3.1 차량모델

본 연구에서는 동특성 해석을 위하여 철도차량의 동특성해석에 특성화된 상용 소프트웨어 VI-Rail²⁾을 이용하였다. 해석에 사용한 차량 모델은 3호선 전동차 Tc car 및 T car 2량 1편성 이며, Tc car는 운전실을 구비하여 전동차를 제어하는 제어차(Train control car)를 말하며, T car는 부수차인 객차(Trailer car)를 말한다.

Table 1. Specification data of Tc car

Index	Parameters	Units	Value
Car body	Length	m	19.95
	Mass of empty car	kg	24670
	Rolling moment of inertia	kg·m ²	60000
	Pitching moment of inertia	kg·m ²	817500
	Yawing moment of inertia	kg·m ²	817500
	Height of center of gravity above the rail	m	1.796
Bogie frame	Bogie frame mass	kg	2030
	Rolling moment of inertia	kg·m ²	1570
	Pitching moment of inertia	kg·m ²	970
	Yawing moment of inertia	kg·m ²	1730
	Height of center of gravity above the rail	m	0.48
Axle	Wheelset mass	kg	1690
	Rolling moment of inertia	kg·m ²	850
	Pitching moment of inertia	kg·m ²	850
	Yawing moment of inertia	kg·m ²	30
	Wheel diameter	m	0.43
Dimension	Distance between bogie centers	m	13.8
	Distance between axles	m	2.1
Primary suspension	Longitudinal stiffness	kN/m	4100
	Lateral stiffness	kN/m	3000
	Vertical stiffness	kN/m	910
Secondary suspension	Longitudinal stiffness	kN/m	120
	Lateral stiffness	kN/m	110
	Vertical stiffness	kN/m	320
Damping	Lateral damping	kN·s/m	940

Table 2. Specification data of T car

Index	Parameters	units	Value
Car body	Length	m	19.5
	Mass of empty car	kg	18630
	Rolling moment of inertia	kg·m ²	45300
	Pitching moment of inertia	kg·m ²	617500
	Yawing moment of inertia	kg·m ²	617500
	Height of center of gravity above the rail	m	2.103
Bogie frame	Bogie frame mass	kg	1840
	Rolling moment of inertia	kg·m ²	1420
	Pitching moment of inertia	kg·m ²	880
	Yawing moment of inertia	kg·m ²	1570
	Height of center of gravity above the rail	m	0.48
Axle	Wheelset mass	kg	1690
	Rolling moment of inertia	kg·m ²	850
	Pitching moment of inertia	kg·m ²	850
	Yawing moment of inertia	kg·m ²	30
	Wheel diameter	m	0.43
	Dimension	Distance between bogie centers	m
Distance between axles		m	2.1
Primary suspension	Longitudinal stiffness	kN/m	3300
	Lateral stiffness	kN/m	2100
	Vertical stiffness	kN/m	820
Secondary suspension	Longitudinal stiffness	kN/m	104
	Lateral stiffness	kN/m	100
	Vertical stiffness	kN/m	269
Damping	Lateral damping	kN·s/m	94

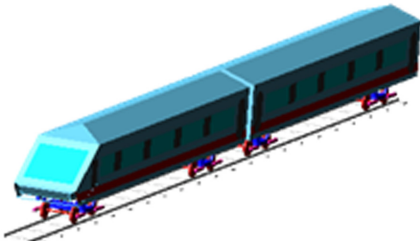


Fig. 3. Vehicle model.

3호선 전동차의 질량 요소는 차체, 전·후위 대차후 레임, 윤축으로 구성되며, 본 연구에서는 각 질량요소를 모델링 하였다. 질량요소의 주요 물성치는 Table 1, 2와 같으며, 완성된 차량 모델은 Fig. 3과 같다.

3.2 차량모델

Fig. 4, 5는 차량과 레일 단면을 나타내고 있다. 차량 모델에는 원호답면과 경사답면의 혼합형태를 보이는 유럽 표준 단면이자 3호선 전동차에 적용된 S1002(UIC510-23)) 차량단면을, 레일 단면에는 60 kg 레일을 사용하였다³⁾.

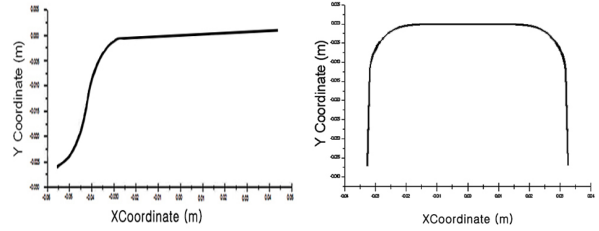


Fig. 4. Wheel profile(S1002). Fig 5. Rail profile(60kg Rail).

3.3 선로조건

3.3.1 선로 선형

선로 모델은 서울메트로의 궤도일람을 참조하였다. 서울메트로 3호선은 도시내부를 가로지르는 도시철도 선로선형의 특성상 다양한 곡선반경이 존재하였다. 이 중 구간 거리가 비교적 길어 해석하기에 용이한 구파발↔연신내 구간을 전산해석 선로 모델로 선정하였다.

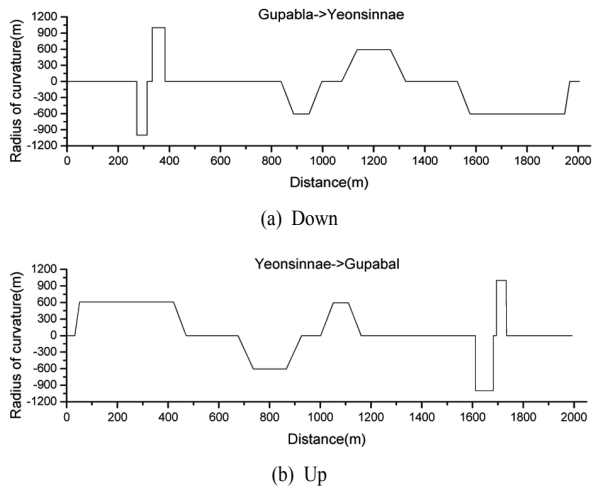


Fig. 6. Radius of curvature of Gupabal↔Yeonsinnae section.

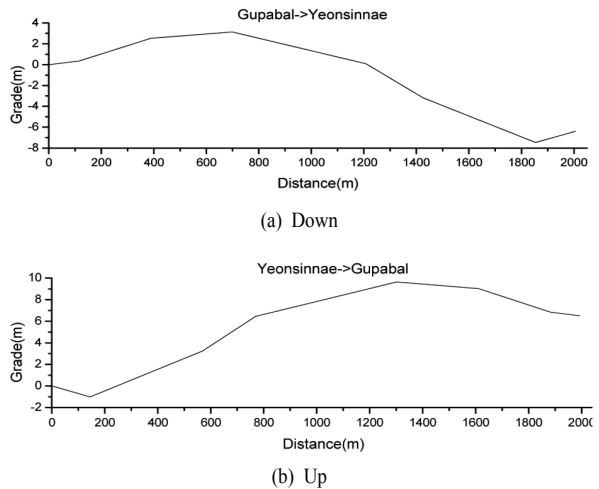


Fig. 7. Grade of Gupabal↔Yeonsinnae section.

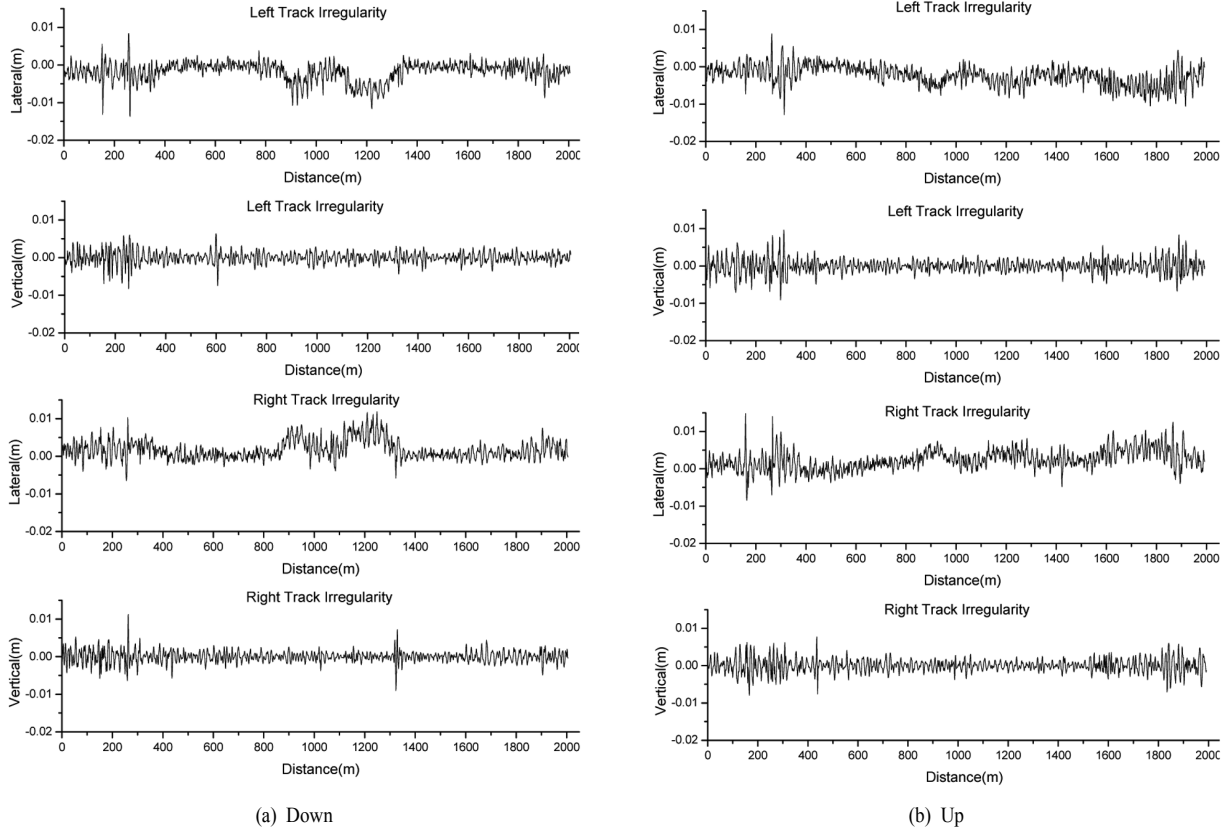


Fig. 8. Track irregularity data of Gupabal↔Yeonsinnae section.

선정된 전산해석 선로모델의 곡선현황은 Fig. 6과 같으며, 구배현황은 Fig. 7과 같다⁴⁾.

3.3.2 궤도틀림 데이터(Track irregularity data)

궤도틀림이란 최초 레일이 부설된 후 열차의 반복하중을 받아 차차 변형하여 차량 주행면에 좌·우·상·하 방향으로 생긴 부정합을 말하며 자갈도상 궤도에서 현저하게 나타난다.

궤도틀림의 종류로는 좌우 레일간격의 틀림으로 궤간의 기본사이즈(표준궤 1,435 mm)에 대한 변화량인 궤간틀림(Gauge Irregularity), 궤간의 기본치수에서의 좌우 레일의 높이차인 수평틀림(Cross Level irregularity), 레일 상면의 길이방향 요철면인 먼틀림(Logitudinal Irregularity), 레일 측면의 길이방향의 요철면인 줄틀림(Alignment Irregularity), 평면에 대한 궤도의 비틀림 상태를 나타내는 평면성틀림(Twist Irregularity)로 이루어진다.

Fig. 8은 연신내-구파발 구간의 상·하행 구간의 좌우상하 방향 궤도틀림 데이터를 나타내고 있으며, 해석시 해당하는 데이터를 적용하였다. 본 데이터는 서울메트로의 궤도검측차에서 검측한 실제 데이터를 VI-Rail에서 요구하는 입력조건으로 변환하여 모델링하였다⁵⁾.

3.3 속도조건

연신내-구파발구간의 제한속도는 서울메트로 3호선의 운전선로도를 참고하였으며 구간별 제한속도는 Fig. 9와 같다⁶⁾.

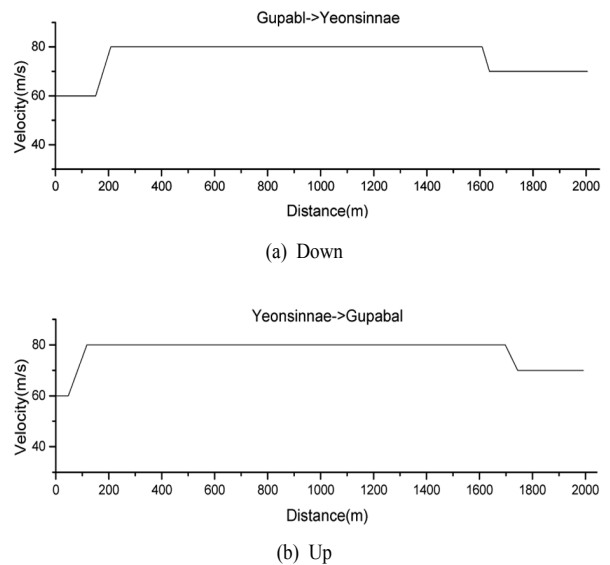


Fig. 9. Velocity limit of Gupabal↔Yeonsinnae section.

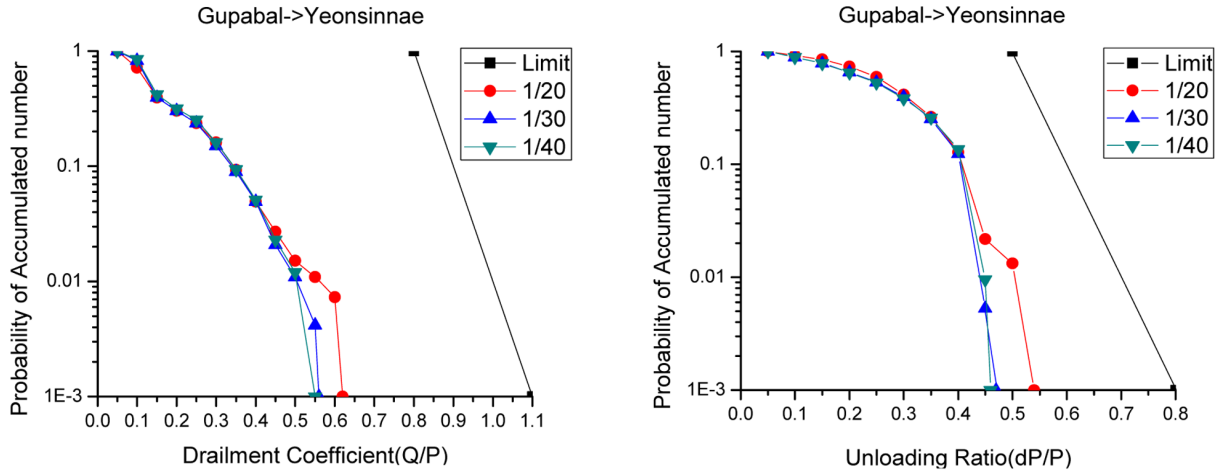


Fig. 10. Analysis results of Gupabal→Yeonsinnae(down) section.

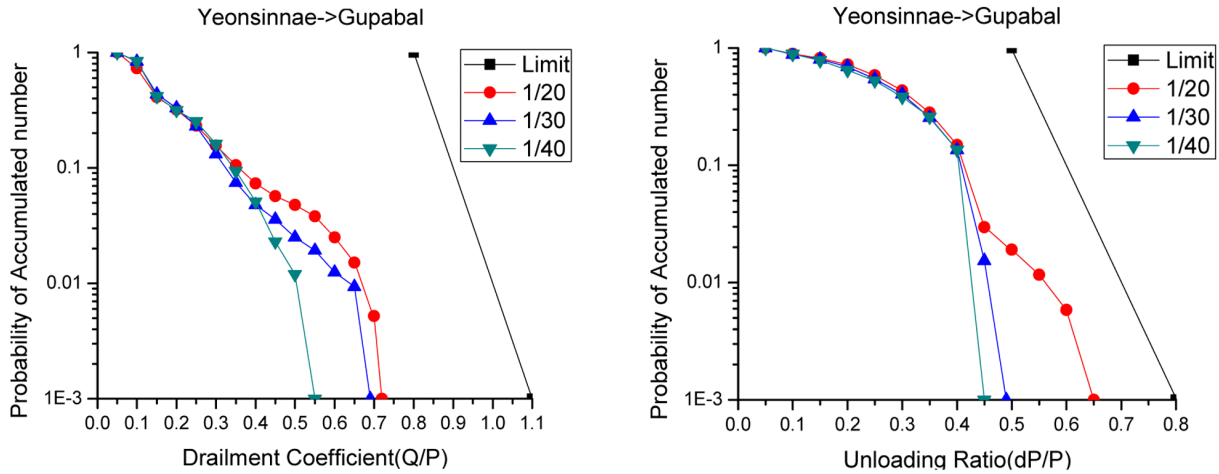


Fig. 11. Analysis results of Gupabal→Yeonsinnae(up) section.

4. 해석결과

탈선계수 및 윤중감소율에 대한 안전도 평가를 위하여 VI-Rail의 해석결과를 30 Hz 로우패스 필터링 후 탈선계수 윤중감소율 결과값을 0.05 단위로 구분하여 평가기준인 빈도누적확률로 표현하였다.

Fig. 10, 11은 3호선 구파발↔연신내 구간의 실제 주행속도 조건에서 레일 경좌 변화(1/20, 1/30, 1/40)에 따른 주행안전성 해석결과를 빈도누적확률로 나타낸 것이며, 각 결과의 최대치는 Table 3과 같다. 구파발↔연신내 구간의 탈선계수, 윤중감소율 모두 철도차량기술 기준의 주행안전성 평가기준 한계치보다 작거나와 안전한 것으로 판단된다. 1/20 레일경좌에서 유독 탈선계수 및 윤중감소율이 불안정하게 나타났으며, 빈도누적확률 및 최대치를 확인하면 레일경좌 1/40에서 주행안전성이 가장 이상적인 것으로 나타났다.

Table 3. The maximum value of Analysis results

Inclination Change		(Q/P)max	(ΔP/P)max
Down	1/20	0.62	0.54
	1/30	0.56	0.47
	1/40	0.55	0.46
Up	1/20	0.72	0.65
	1/30	0.69	0.49
	1/40	0.55	0.45

4. 결론

본 논문에서는 탈선의 위험도가 높은 곡선부를 통과하는 전동차의 주행안전성 평가를 위하여 3호선 실제 선로 조건인 연신내↔구파발 상·하행 구간의 곡선부 구간별 통과시 레일 경좌 변화에 따른 주행안전성 해석을 수행하였다.

VI-Rail 프로그램을 이용한 해석을 통해 기존 3호선 연신내↔구파발 구간에서는 레일경좌 1/20, 1/30, 1/40 모두에서 탈선계수 및 윤중감소율의 한계치를 초과하지 않는 것으로 나타났으며, 레일 경좌 1/40에서 가장 안정적인 것으로 판단되어, 기존선 주행시 가장 안전하다는 것을 해석적으로 재확인하였다.

감사의 글: 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었음.

References

- 1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “Technical Specifications for Urban Railway Vehicles”, 2014.
- 2) VI grade, “VI-Rail 12.0. Documentation”, 2008.
- 3) UIC code 510-2(E), “Trailing stock : Wheel and Wheelsets. Conditions Concerning the use of Wheels of Various Diameters”, 2004.
- 4) Seoulmetro, “Track List of Line No.3”, 2011.
- 5) Seoulmetro, “Track Irregularity Data of Line No.3”, 2013.
- 6) Seoulmetro, “Train Driving Rules for Line No.3”, 2011.
- 7) UIC code 518 OR 3rd Edition, “Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of View of Their Dynamic Behaviour-Safety-Trackfatigue-Ridequality”, 2005.