

• 특집 • 철도차량과 레일의 구성요소에 대한 성능과 해석 평가

궤도틀림 특성이 철도차량 주행성능에 미치는 영향 해석

Dynamic Analysis of the Influence of the Track Irregularity on the Running Performance of the Railway Vehicle

강부병^{1,#}
Bu Byoung Kang^{1,#}

¹ 우송대학교 철도차량시스템학과 (Department of Railroad Vehicle System Engineering, Woosong University)
Corresponding Author / E-mail: bbkang@wsu.ac.kr, TEL: +82-42-629-6693

KEYWORDS: Track irregularity (궤도틀림), Vertical irregularity (고저틀림), Lateral irregularity (방향틀림), Lateral force (횡압), Derailment coefficient (탈선계수)

Carrying out accurate and reliable track maintenance tasks is very important to improve the running safety of a railway vehicle and the ride quality for the passenger. For this purpose, appropriate track management standards need to be set by analyzing the field test results for setting reliable management criteria. However, in practice, it is difficult to quantitatively examine the various track fault conditions. Therefore, investigation of the influence of various track characteristics on the running safety and ride quality was performed through numerical analysis method. The influence of the track irregularities on the wheel lateral forces, derailment coefficients, and accelerations on the bogie and car body was investigated through numerical analysis.

Manuscript received: October 1, 2017 / Revised: November 13, 2017 / Accepted: November 26, 2017

NOMENCLATURE

IR = Irregularity at the specified distance
 λ = Wave length
A = Amplitude of irregularity
S = Distance

1. 서론

철도차량의 주행안전성을 향상시키고 승객의 승차감을 향상시키기 위해서는 정확하고 신뢰성 있는 궤도틀림의 유지보수가 매우 중요하다. 이를 위해서는 적절한 궤도틀림 관리기준의 설정이 매우 중요하다. 또한 철도 현장의 흑자경영에 대한 요구가 증가하면서 철도시스템 유지보수 비용을 줄이고자 하는 연구도 많이 진행

되고 있다. 경제적 유지보수를 위해서는 적절한 유지관리 기준 설정이 필수적이다. 그러나 최근까지도 국내의 궤도틀림 관리 기준은 외국의 기준을 도입하여 사용되는 수준이었다. 이런 가운데 한국 환경에 맞는 경제적 유지보수 기준 설정을 위해 체계적으로 궤도관리 기준을 검토하고 관련 기술을 연구해야 하는 필요성이 대두되고 있다. 이런 차원에서 국내에서도 새로운 연구결과들을 반영하여 기준들을 개정하고 합리적인 유지보수 체계를 만들어 가고 있다. 남덕희¹ 등은 궤도 검측 차량의 검측 데이터를 활용하여 궤도틀림의 추세를 분석하고 이를 활용하는 방안에 대하여 연구하였고 신길철² 등은 정기적인 종합 검측차의 검측데이터 출력 결과를 이용 궤도틀림 진행 정도와 표준편차가 시계열에 따라 변화는 진전율을 살펴보고, 국내, 외에서 적용하고 있는 궤도품질 기준을 서울메트로 일부 구간의 궤도상태와 비교 분석하였다. 김남홍³ 등은 궤도품질지수를 제안하고 궤도틀림의 진전을 예측하는 모델에 대하여 연구하였다. 이지하⁴ 등은 궤도틀림 검측 결과를 유지보수에 효과적으로 활용하는 방안 등을 연구하였고 김대영⁵

등과 고재현⁶ 등은 궤도 틀림의 진전예측방법에 대하여 연구하였다. 최일윤^{7,8} 등은 고저틀림과 방향틀림이 KTX 주행특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

이러한 분위기는 국내뿐만 아니라 국외에서도 지속적으로 유지보수 합리화를 위한 연구가 진행되고 있고 자국의 철도운영환경에 적합한 기준을 설정하고 개정하고 있다.⁹⁻¹¹ 따라서 본 논문에서는 궤도틀림이 차량주행안전성 및 승차감에 미치는 영향을 검토하기 위하여 차량 동역학 프로그램인 VAMPIRE를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통해 방향 틀림, 고저틀림이 차량주행성능 지수인 횡압, 탈선계수, 차체와 대차의 진동에 미치는 영향을 분석하였다.

차량의 주행성능 해석을 통하여 궤도틀림이 차량의 주행성능에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 검토 할 기준 지수를 결정하여야 한다. 본 연구에서는 안전성 지수인 횡압과 탈선계수 그리고 승차감에 영향을 주는 차체와 대차의 진동 가속도를 해석적으로 계산하여 그 영향을 파악하고자 하였다.

2. 해석모델

2.1 주행성능 해석

2.1.1 주행성능 지수

차량이 주행할 때 레일과 차륜은 차량의 정적 하중 외에 주행시의 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 미끄러져올라 탈선을 하게 되므로 주행안전성 검토의 기준이 된다. 실제 탈선현상은 선로선형, 궤도틀림과 차량의 특성이 반영된 동역학적 특성에 의해 검토되어야 하며 간단한 식으로는 설명할 수 없는 주행 각, 크립 특성 등 여러 파라미터의 상호작용으로 탈선이 발생한다. 일반적으로 탈선계수의 안전기준은 빈도누적 확률로 나타내어 100%일 때 0.8, 0.1%일 때 1.1 이하이다.

차량이 주행하게 되면 차륜과 레일 사이의 작용력의 변화에 따라서 좌우 진동이 커지거나 곡선부 통과 시 차륜과 레일 사이의 원심력의 작용에 의한 차륜 플랜지와 레일의 접촉으로 횡압이 크게 발생한다. 어떠한 경우여라도 횡압이 윤중보다 커지게 되면 탈선의 위험성은 그만큼 높아지는 것이다. 이러한 플랜지 접촉에 영향을 미치는 것이 차륜과 레일 사이의 작용력의 변동으로 발생하는 윤축의 거동이며 이 운동에 중요한 영향 인자가 궤도 틀림이다.

2.1.2 궤도틀림

Fig. 1은 본 연구에 사용된 세가지 틀림의 좌표축 설정을 보여준다. 수평틀림은 좌우 레일의 높이의 차이를 의미하며 곡선부에서는 설정된 캔트량을 적용한 면을 기준으로 변화된 크기를 의미한다. 고저틀림은 레일 상면의 길이방향 요철의 양으로서 평탄면을 기준으로 궤도의 수직방향 변화량을 나타낸다. 방향틀림도

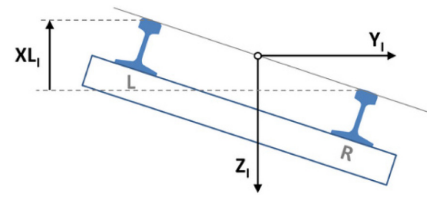


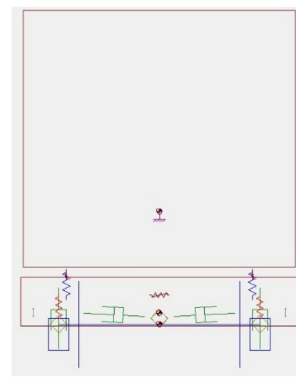
Fig. 1 Irregularity axes system for lateral irregularity (YI), Vertical irregularity (ZI) and cross level (XLI)



(a) General



(b) Side



(c) End

Fig. 2 Vehicle model of a typical four axled passenger coach with a maximum operating speed of 200 km/h

길이방향 요철로서 진행방향에 대하여 레일의 횡방향 변화량을 나타낸다. 방향틀림은 Fig. 1에서 Y축 방향 변화량 일 때 양의 값을 갖고 Z축 방향은 고저틀림을 위한 좌표축으로서 아래방향 변화량이 양의 방향이다. 수평틀림을 나타내는 XL 값은 좌측 레일이 우측 레일보다 높을 때 양의 값을 갖는다. 일반적으로 철도차량의 운행 중 궤도침하, 궤도변형, 노반 침하, 노후 부품 등에 의하여 궤도 틀림이 발생하게 된다.

2.2 동역학 해석 모델

2.2.1 차량모델

차량동역학 해석은 영국 Delta Train사에서 개발한 철도 차량 동역학 전용해석 프로그램인 Vampire (Ver.6.2)를 이용하여 수행되었고 2축 대차 두 개와 4개의 축으로 구성된 차량이 해석 차량

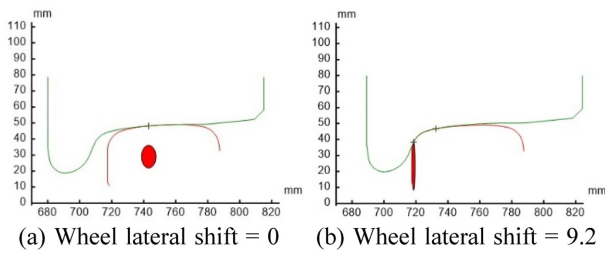


Fig. 3 Wheel rail model

Table 1 Contact parameters

Parameter	Value
Wheel	br-p8
Rail	BS113a-20
Axle load	150 KN
Wheel diameter	1000 mm
Track gage	1435 mm

으로 사용되었다. Fig. 2는 본 해석에 사용된 차량 모델로서 Vampire 내부 라이브러리에서 제공된 200 km/h급 4축 차량 모델이다. 좌표계의 중심은 차량 시스템 중심의 레일 상면에 위치하며, X와 Z방향은 각각, 차량의 진행방향과 연직 하 방향으로 설정하였고, X, Y, Z방향에 대한 회전은 각각 T (Rolling), P (Pitching), 및 W (Yawing)이다.

2.2.2 차륜과 레일 접촉모델

본 해석에는 비선형 접촉모델을 사용하였다. Vampire 전 처리 장치에는 비선형 크립법칙을 적용한 차륜과 레일 접촉 데이터를 계산하여 비선형 과도해석과 곡선해석에 이용할 수 있는 처리기가 있다. 이때 접촉데이터를 계산하기 위해서는 차륜과 레일의 형상 데이터가 필요하다. Fig. 3에 제공된 것과 같이 가로축에 궤도 중심으로부터의 거리에 대하여 차륜과 레일의 형상데이터와 Table 1에 나타난 차륜의 외경, 축중, 레일 궤간 등을 입력으로 필요로 한다. Fig. 3(a)는 차륜의 횡변위가 0 mm인 경우로 차륜 중심이 궤도중심에 위치할 경우 오른쪽 차륜과 레일 사이의 접촉면이 타원형이며 Fig. 3(b)는 차륜이 오른쪽으로 횡변위 9.2 mm이 동한 경우로서 플랜지 접촉이 발생하여 접촉면이 주행방향과 나란하게 좁고 길게 형성되는 것을 알 수 있다.

2.2.3 궤도틀림 모델

궤도틀림은 식(1)과 Sin 함수로 모델링하여 틀림의 크기와 파장을 조절하여 해석에 사용하였다.

$$IR = A \sin 2\pi \frac{S}{\lambda} \tag{1}$$

여기서 IR은 틀림의 함수이며 A는 해당틀림의 크기, S는 거리를

Table 2 Irregularity modeling parameters

Wavelength λ (m)	Amplitude A (mm)			
	7	14	21	28
5	7	14	21	28
10	7	14	21	28
20	7	14	21	28
30	7	14	21	28
70	7	-	-	-
100	7	-	-	-

는 파장을 의미한다. 본 연구에 사용한 궤도틀림 파라미터를 Table 2에 나타내었다. Table 2의 파라미터를 식(1)에 대입하여 구한 궤도틀림이 선로의 일부 구간이 아닌 해석 구간 전체에 동일하게 지속적으로 존재하는 것으로 가정하여 궤도 데이터를 모델링하였다. 장파장인 70 m와 100 m의 경우는 작은 틀림 크기는 영향이 미미하여 영향을 미칠 수 있는 크기가 어느 정도인지에 대한 적절한 크기의 틀림 설정에 대한 추가 연구가 필요하여 본 연구에서는 일단 제외하였다.

3. 해석결과

3.1 방향틀림의 영향 해석

Figs. 4부터 8은 Table 2에서와 같이 방향틀림의 파장을 5 m에서부터 100 m까지 조절하고 틀림의 진폭은 7 mm, 14 mm, 21 mm 세가지로 크기를 조절하면서 해석적으로 구한 횡압, 차체 횡가속도, 차체 수직방향 가속도, 대차의 가속도, 탈선계수 등을 보여주고 있다. 해석에 사용된 주행속도는 150 km/h로 국내 기존선에서 최고속도로 운행되고 있는 새마을호 수준의 주행속도로 해석을 수행하였다. 횡압과 탈선계수는 가장 큰 값을 보이고 있는 전위대차의 전위 차륜에서 구한 값이다. 대차 횡가속도는 전위 대차 질량중심의 가속도이며 차체가속도는 차체의 질량중심에서 구한 횡가속도이다.

Fig. 4는 방향틀림의 특성에 따른 횡압의 변화를 보여준다. 방향틀림의 크기가 클수록 횡압도 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 파장의 크기가 작아질수록 동일한 틀림 크기에 대하여 더 큰 횡압을 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 그 크기는 가장 큰 값을 보인 파장 5 m에서 방향틀림의 진폭이 21 mm일때도 49.2 kN으로 횡압의 한계치인 55 kN보다는 작아 여유가 충분히 있는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 방향틀림의 특성에 따른 차체의 횡방향 가속도이다. 방향틀림의 크기가 클수록 횡방향 가속도가 증가하고 있고 특히 파장 20 m에서 큰 피크값을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 본 해석에 사용된 차륜과 레일 사이의 등가 답면 구배가 0.192로 이 값과 차량의 축거 3 m, 차륜 반경 1000 mm 등을 이용하여 구한 사행동 파장이 20 m인 것으로 볼 때 사행동 파장과 동일한 파장으로 변동하는 방향 틀림의 영향으로 큰 횡 방향

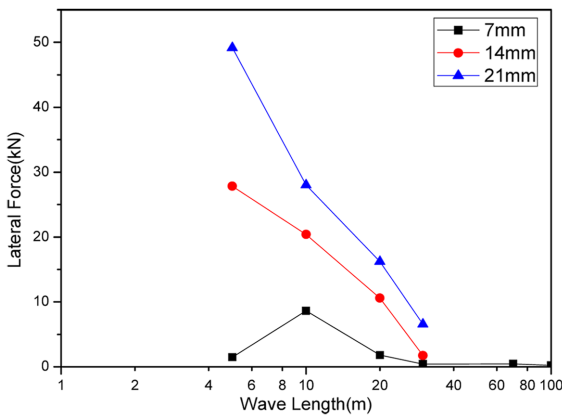


Fig. 4 Lateral force (RMS) according to the change of the wavelength and amplitude of the lateral irregularity

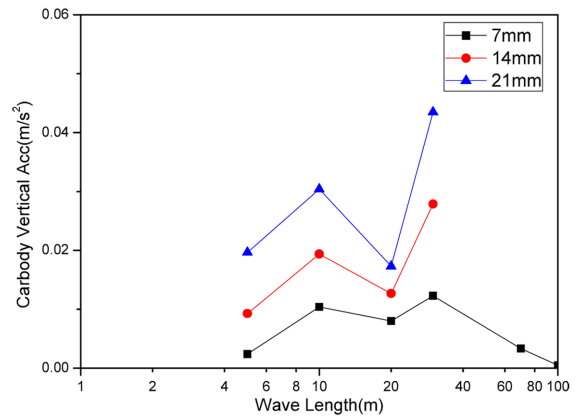


Fig. 6 Car body vertical acceleration (RMS) according to the change of the wavelength and amplitude of the lateral irregularity

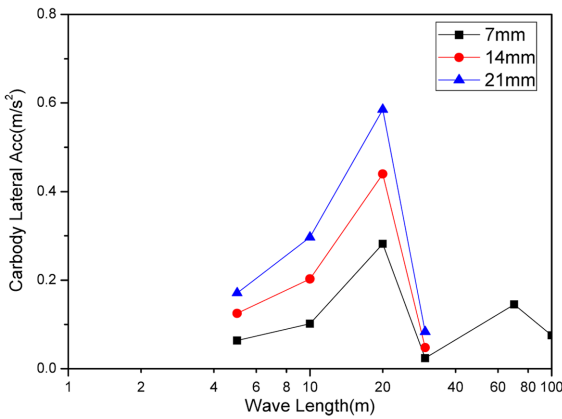


Fig. 5 Car body lateral acceleration (RMS) according to the change of the wavelength and amplitude of the lateral irregularity

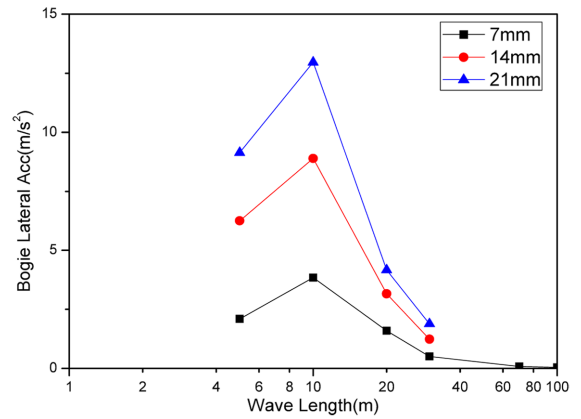


Fig. 7 Bogie lateral acceleration (RMS) according to the change of the wavelength and amplitude of the lateral irregularity

가속도값을 보이는 것으로 판단된다. 하지만 최대값을 보이고 있는 파장이 20 m이고 방향 틀림 진폭이 21 mm인 경우에 0.6 m/s^2 로서 진동 한계치인 2.5 m/s^2 보다 작은 값을 보이고 있다. Fig. 6은 차체의 수직방향 가속도를 보여주고 있다. 차체의 횡 방향 가속도와 다르게 방향틀림의 영향이 매우 작은 것을 알 수 있고 대체로 틀림의 크기가 클수록 큰 값을 보이는 경향을 보여주고 있다. Fig. 7은 방향틀림의 변화에 대한 대차의 횡 방향 가속도로서 파장 5 m일 때와 10 m일 때는 틀림의 크기가 14 mm인 경우와 21 mm인 경우 국내 한계치인 6 m/s^2 보다 큰 값을 보이고 있어 적절하게 관리가 필요한 것을 알 수 있다.

파장이 5 m인 경우 틀림의 크기가 14 mm일 때는 6.2 m/s^2 , 21 mm인 경우 9.1 m/s^2 이고 파장이 10 m인 경우 틀림의 크기가 14 mm일 때는 8.9 m/s^2 , 21 mm인 경우 13.0 m/s^2 이다. 국내기준은 유지관리 기준이 16 mm 이하로 관리되고 있어 차량조건이 다르긴 하지만 Fig. 7의 결과와 비교하여 대차의 횡방향 가속도 측면에서는 약간 완화된 수준에서 관리가 되고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 탈선계수를 보여준다. 탈선계수는 Fig. 4의 횡압과 비슷한

경향을 보여주고 있다. 방향틀림이 클수록 횡압이 커지고 상응하는 탈선계수도 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 한계치인 0.8보다는 작지만 방향틀림이 14 mm인 경우 0.45, 21 mm인 경우 0.56 정도로 방향 틀림의 효과가 크기 때문에 적절한 수준으로 관리가 필요하며 국내 기준인 16 mm와 비교할 때 국내기준은 충분히 안전한 기준인 것으로 판단할 수 있다.

3.2 고저틀림의 영향 해석

Figs. 9부터 13은 Table 2에서와 같이 고저틀림의 파장을 5 m에서부터 100 m까지 조절하고 틀림의 진폭은 7 mm, 14 mm, 21 mm, 28 mm의 네 가지로 크기를 조절하면서 해석적으로 구한 횡압, 차체 횡 가속도, 차체 수직방향 가속도, 대차의 가속도, 탈선계수 등을 보여주고 있다. 주행속도는 150 km/h이다. Fig. 9는 고저틀림의 변화에 대한 횡압의 변화를 보여준다. 고저틀림의 크기가 클수록 횡압도 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 파장의 크기가 작아질수록 동일한 틀림 크기에 대하여 더 큰 횡압을 보여주고 있고 틀림이 큰 21 mm, 28 mm의 경우가 파장 5 m에서

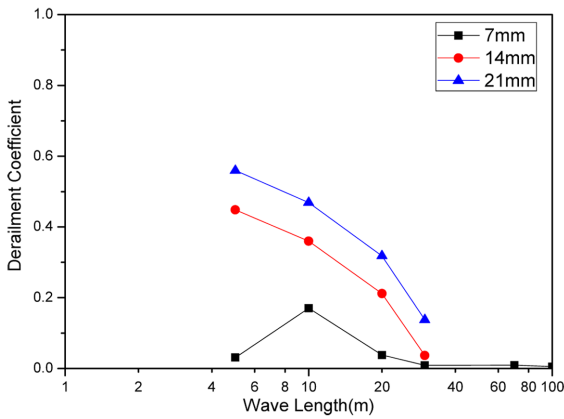


Fig. 8 Derailment coefficient (RMS) according to the change of the wavelength and amplitude of the lateral irregularity

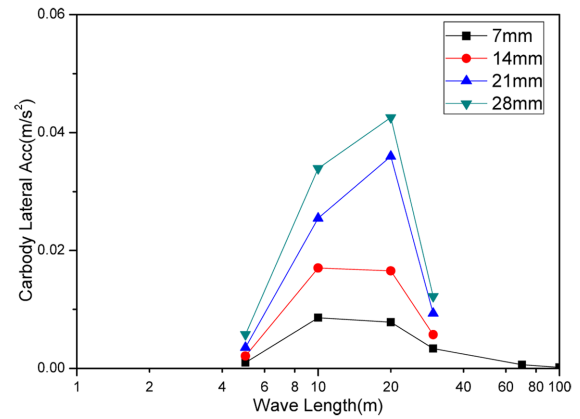


Fig. 10 Car body lateral acceleration (RMS) according to the change of the wavelength and amplitude of the vertical irregularity

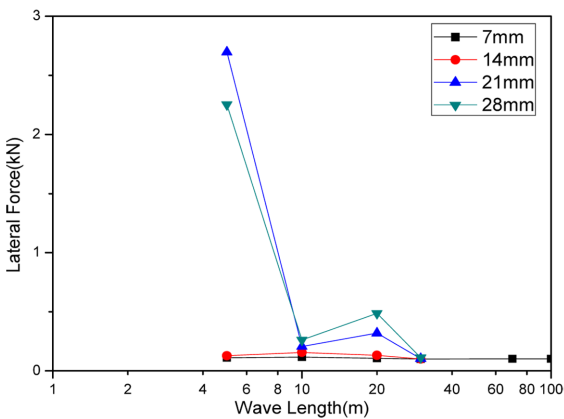


Fig. 9 Lateral force (RMS) according to the change of the wavelength and amplitude of the vertical irregularity

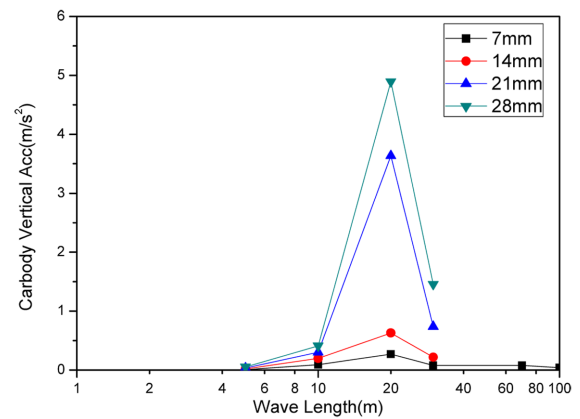


Fig. 11 Car body vertical acceleration (RMS) according to the change of the wavelength and amplitude of the vertical irregularity

상대적으로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 그 크기는 고저틀림이 28 mm인 경우에 2.7 kN으로서 방향틀림의 진폭이 21 mm일 때의 횡압인 49.2 kN과 비교하여 매우 작아 고저 틀림이 횡압에 미치는 영향은 미미한 것을 알 수 있다. Fig. 10은 고저틀림의 변화에 대한 차체의 횡방향 가속도이다. 고저틀림의 크기가 클수록 횡 방향 가속도가 증가하고 있고 특히 파장 20 m에서 최대값을 보이고 있는 것은 방향틀림의 영향과 유사한 결과를 보여 주고 있다. 하지만 파장 20 m, 고저틀림 크기 28 mm에서 0.04 m/s²으로서 상대적으로 그 크기는 작아서 고저틀림은 차체의 횡 방향 가속도에 미치는 영향이 미미한 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 고저틀림의 변화에 대한 차체의 수직방향 가속도를 보여주고 있다. 차체의 횡 방향 가속도와 다르게 고저틀림의 영향이 매우 큰 것을 알 수 있고 대체로 틀림의 크기가 클수록 큰 값을 보이는 경향을 보여주고 있다. 특히 파장 20 m에서 고저 틀림 크기가 21 mm와 28 mm인 경우에 각각 3.6 m/s²과 4.9 m/s²로 국내 차체 가속도 한계치인 2.5 m/s²를 초과하고 있다.

고저틀림 크기가 14 mm인 경우는 0.6 m/s²로서 국내 고저틀림

유지보수 관리 기준인 18 mm 기준은 차량특성과 차륜과 레일접촉 특성은 다르지만 안전한 수준에서 관리되고 있는 것으로 판단 된다. Fig. 11의 결과를 볼 때 국내 고저틀림 유지보수관리 기준은 의미가 있는 적절한 기준으로 판단된다.

Fig. 12는 고저틀림의 변화에 대한 대차의 횡 방향 가속도로서 역시 횡 방향 운동에 민감한 파장인 파장이 20 m인 경우 상대적으로 큰 값을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 최대값을 보이고 있는 고저틀림 진폭이 28 mm인 경우에 0.6 m/s²으로서 국내 한계치인 6 m/s²보다 매우 작은 결과값으로 고저틀림은 횡 방향 가속도에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. Fig. 13은 고저틀림의 변화에 대한 탈선계수를 보여준다. Fig. 9의 횡압과 비슷한 경향을 보여주고 있다. 그러나 크기에 있어서는 파장 5 m에서 고저틀림 진폭이 21 mm, 28 mm인 경우에 각각 0.02와 0.04로서 매우 작은 값이다. 이 값은 Fig. 8에서 보여주고 있는 방향틀림이 21 mm인 경우의 탈선계수인 0.56과 비교할 때 매우 작아서 고저틀림이 탈선계수에 미치는 영향은 매우 작은 것을 알 수 있다.

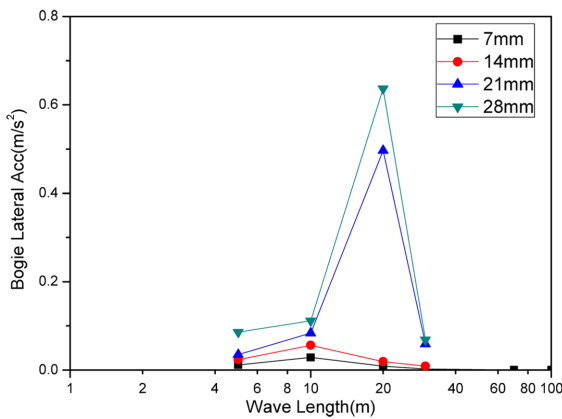


Fig. 12 Bogie lateral acceleration (RMS) according to the change of the wavelength and amplitude of the vertical irregularity

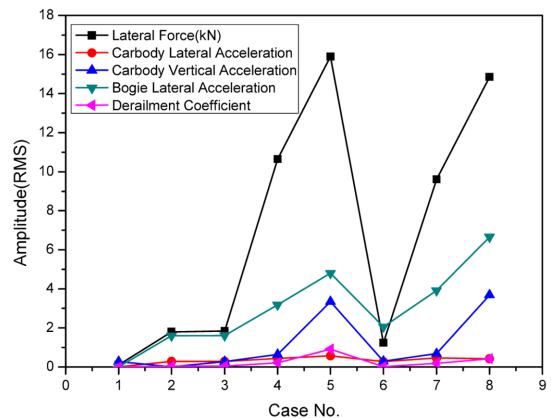


Fig. 14 Comparison of the dynamic performance parameters obtained under the different combination of the lateral, vertical and cross-level irregularities

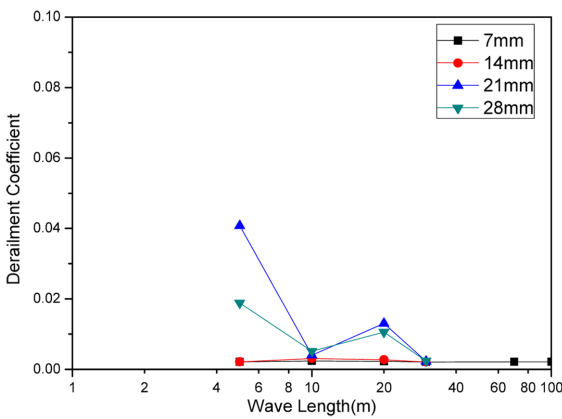


Fig. 13 Derailment coefficient (RMS) according to the change of the wavelength and amplitude of the vertical irregularity

Table 3 Irregularity modeling parameters for investigating combination effect (Wavelength: 20 m)

Case	Irregularity	Amplitude (mm)
1	Vertical	7
2	Lateral	7
3	Vertical lateral	7
4	Vertical lateral	14
5	Vertical lateral	21
6	Vertical lateral cross-level	7
7	Vertical lateral cross-level	14
8	Vertical lateral cross-level	21

3.3 틀림의 경합 특성

3.1절과 3.2절은 각각 방향틀림과 고저 틀림만 존재할 때의 결과를 보여준다. 그러나 실제 조건은 이러한 방향 틀림이 경합되어 나타나기 때문에 경합효과를 해석하여 경향을 파악하고자 하였다. Table 3은 경합특성을 비교 평가하기 위한 8가지 Case의 틀림 해석 조건을 보여준다. 파장은 20 m로 통일시키고 서로 다른 틀림을 조합하고 그 틀림의 크기를 조정하여 효과를 분석하였다. 모든 틀림은 식(1)을 이용하여 틀림데이터를 모델링 하여 사용하였고 경합조건 구현시에는 동일한 크기와 위상을 부여하였다. Fig. 14의 결과를 보면 7 mm의 크기가 적용된 경우 단일 틀림이 작용했을 때나 경합조건이나 큰 차이가 없었다. 경합조건인 경우도 단일틀림의 경우와 같이 틀림의 크기가 커지면 주행안전성 지수들이 커지고 있는데 특히 횡압이나 대차 횡 방향 가속도는 현격하게 커지는 것을 확인할 수 있다. Table 4는 파장이 20 m이고 크기가 21 mm인 경우 단일틀림의 경우와 경합 조건인 경우 5가지 주행안전성 지수 결과값을 비교하여 보여준다. 횡압의 경우는 방향 틀림만 작용한 경우가 가장 크고 고저틀림은 큰 영향이 없는 것을 알 수 있다.

Table 4 Combination effect of irregularity (Wavelength: 20 m, Amplitude: 21 mm)

	V	L	V+L	V+L+C
Lateral force (kN)	0.32	16.20	15.89	14.85
Car body lateral acceleration (m/s²)	0.04	0.59	0.57	0.42
Car body vertical acceleration (m/s²)	3.64	0.02	3.35	3.69
Bogie lateral acceleration (m/s²)	0.50	4.17	4.80	6.65
Derailment coefficient	0.01	0.32	0.92	0.42

차체의 횡 방향 가속도의 경우도 방향틀림만 작용한 경우가 가장 컸다. 차체 수직방향 진동의 경우는 고저틀림만 작용한 경우가 수평 틀림이 같이 작용한 경우보다 약간 큰 결과를 얻어 고저틀림의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 대차 횡가속도의 경우는 고저틀림, 방향틀림과 함께 수평틀림이 복합적으로 작용하면 6.65 m/s²의 가장 큰 값을 얻는 것을 알 수 있다. 탈선계수의 경우는 방향틀림과 함께 고저 틀림이 작용할 때 큰 값을 보였는데 이는 고저 틀림

으로 인하여 수직력이 작아질 경우 횡압과 수직력의 비인 탈선계수가 크게 증가할 수 있음을 보여준다. 따라서 일반적으로 곡선부에서 나타나는 윤증변동과 탈선계수의 증가 현상과 같이 방향 틀림과 고저 틀림이 동시에 발생할 경우에는 궤도관리에 주의하여야 함을 보여준다.

4. 결론

궤도틀림이 차량주행성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 차량 동역학 해석 프로그램인 VAMPIRE를 이용하여 수치해석을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 횡압과 횡방향 가속도에는 방향틀림의 영향이 크게 작용하며 고저틀림의 영향은 미미하였다. 파장 5 m인 경우 고저틀림이 28 mm인 경우에 횡압은 2.7 kN으로서 방향틀림의 진폭이 21 mm 일 때의 횡압인 49.2 kN과 비교하여 매우 작아 고저 틀림이 횡압에 미치는 영향은 미미한 것을 알 수 있다. 대차 횡방향 가속도의 경우 최대값이 고저틀림 파장이 20 m, 진폭이 28 mm인 경우에 0.6 m/s²의 값을 보였고 방향 틀림은 파장이 10 m, 진폭이 21 mm인 경우 13.0 m/s²이다.

(2) 방향 틀림은 횡압과 함께 탈선계수에도 큰 영향을 미치기 때문에 주행안전성을 위해 적절한 값으로 관리되어야 한다. 파장 5 m에서 고저틀림 진폭이 28 mm인 경우에 0.04로서 매우 작은 값이나 동일파장에서 방향틀림이 21 mm인 경우의 탈선계수가 0.56이었다. 방향틀림과 비교하여 고저틀림이 탈선계수에 미치는 영향은 매우 작았다. 특히 파장 20 m에서 방향틀림이 더 크게 주행 안전성 지수에 영향을 미쳤는데 이 크기는 사행동 파장과 유사한 크기로서 사행동 파장과 유사한 파장대역의 방향틀림은 더 큰 영향을 미치고 있으므로 주의 깊은 관리가 필요하다.

(3) 고저 틀림의 경우 차체 수직방향 가속도에 큰 영향을 미쳤고 가속도 한계치를 고려하여 적절하게 관리되어야 한다. 특히 파장 20 m에서 고저 틀림 크기가 21 mm와 28 mm인 경우에 각각 3.6 m/s²과 4.9 m/s²로 국내 차체 가속도 한계치인 2.5 m/s²를 초과하였다.

(4) 궤도 틀림들이 경합되어 발생하는 특성을 검토한 결과 횡압과, 차체 횡가속도, 차체 수직방향 가속도는 단일틀림이 작용한 경우가 더 큰 영향을 미치고 있었다. 방향틀림은 차체 횡 방향 진동과 횡압에 영향이 컸고 고저틀림은 차체 수직방향 가속도에 큰 영향을 미쳤으며 경합에 의한 영향은 미미하였다. 그러나 파장이 20 m, 틀림의 진폭이 21 mm인 경우와 같이 방향틀림과 고저틀림이 경합되어 있고 그 크기가 큰 경우에는 탈선계수가 0.92로서 높음으로 주의 깊게 관리하여야 함을 알 수 있었다. 대차 횡방향 가속도의 경우는 세가지 틀림이 복합적으로 작용할 때 가장 큰 진동가속도를 보여주고 있어 경합의 효과가 크게 나타났다.

향후에는 차량의 특성에 따른 궤도틀림이 주행안전성에 미치는 영향과 차량의 공진특성과 궤도 틀림의 파장대역과의 관계에 대하여 좀더 심도 있는 연구가 필요하리라 생각된다. 또한 경합조건을

좀 더 세밀하게 분류하여 위험도를 증가시키는 경합조건들에 대하여 확인하고 궤도관리에 적용하는 방안들에 대한 연구가 필요하다.

REFERENCES

1. Nam, D.-H., Seo, B.-P., Choi, K.-M., Kang, I., Shim, K.-S., et al., "A Study for Preventive Maintenance of Rail Deterioration," Proc. of the Korean Society for Railway Autumn Conference, pp. 553-557, 2016.
2. Shin, G.-C., Lee, D., Oh, H., and Park, Y., "A Study on the Progress of Track Irregularity by Track Structure," Proc. of the Korean Society for Railway Autumn Conference, pp. 272-279, 2012.
3. Kim, N.-H., "Introduction of Track Quality Index (TQI) Methods Using Track Induction Data," Journal of the Korean Society for Railway, pp. 311-319, 2009.
4. Lee, J. and Choi, Y. B., "Application of Track Recording Data for Track Maintenance," Proc. of the Korean Society for Railway Autumn Conference, pp. 3057-3063, 2009.
5. Kim, D.-Y., "Track Deterioration Prediction and Scheduling for Preventive Maintenance of Railroad," Journal of the Korean Society for Railway, pp. 1346-1357, 2008.
6. Ko, J.-H., "An Analysis of the Track Irregularity Progress on the Various Track System in Urban Transit," Proc. of the Korean Society for Railway Autumn Conference, pp. 311-319, 2011.
7. Choi, I.-Y., Koo, D. H., Hwang, S. Y., and Lim, Y.-S., "Analysis on Safety and Ride Comfort of KTX according to Track Surface," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 13, No. 6, pp. 583-588, 2010.
8. Choi, I.-Y., Um, J.-H., and Kim, M.-C., "Analysis of the Influence of Track Alignment on Ride Comfort and Safety of KTX," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 16, No. 2, pp. 110-116, 2013.
9. Seoulmetro, "Terms of Track Maintenance," 2013.
10. Meier-Hirmer, C., Senée, A., Riboulet, G., Sourget, F., and Roussignol, M., "A Decision Support System for Track Maintenance," Computers in Railways X, pp. 217-226, 2006.
11. Breiman, L., Friedman, J., Stone, C. J., and Olshen, R. A., "Classification and Regression Trees," CRC Press, 1984.