

고속화 시 철도구조물이 윤중변동에 미치는 영향 평가

Evaluation on the effects of railroad structures affecting on wheel load fluctuations

홍건영*[†], 김대상*, 강운석*

Gun-Young Hong*[†], Dae-Sang Kim*, Yun-Suk Kang*

Abstract In this study, we tried to predict wheel load fluctuations (WLFs), which are one of the key factors affecting acceleration. We performed field running tests twice using the KTX-Sancheon trains on the Gyeongbu HSL. They travelled between Gwangmyeong and Daejeon at the maximum running speed of 302 and 335km/h, carefully measuring WLFs with the telemetry system (the radio data transmitter and the receiver system) at varying speeds. Additionally, effects from structures that greatly impact WLFs, such as turnouts and railroad structures were evaluated quantitatively. Among them, turnouts had the greatest impacts on the WLFs.

Keywords : High_Speed Line(HSL), Speed Up, 400km/h, Wheel Load Fluctuations

초 록 동 연구에서는 기존 고속선 속도향상 시 주요 고려항목 중의 하나인 윤중 변동을 예측하고자 하였다. 이를 위하여 경부 고속선(광명~대전 129.998km구간)에서 KTX-Sancheon 차량을 이용하여 최고속도 302km/h와 335km/h로 주행 시 속도 증감에 따른 윤중 변동을 무선 데이터 송수신 기법을 활용하여 측정하였다. 확률론적 데이터 분석을 통하여 윤중 변동에 큰 영향을 미치는 분기기 등 철도구조물에 의한 영향을 정량적으로 평가하였다.

주요어 : 고속선, 속도향상, 400km/h, 윤중변동

1. 서 론

최근 고속철도의 운영속도를 300km/h이상으로 높이하고자 하는 요구가 한국, 중국, 일본을 중심으로 활발히 전개되고 있다. 이와 같은 세계 고속철도 속도향상의 흐름 속에서 한국은 2012년에 최고속도 430km/h이며 영업최고속도 400km/h인 동력 분산 식 고속차량 HEMU-430X를 개발 완료하였다.

그러나 설계속도 350km/h인 기존 고속선에서 400km/h이상으로의 속도향상을 위해서는 기존 고속선에 대한 보강 필요성에 대한 사전 검토를 요한다. 여러 내용 중에서 증속에 따른 윤중 변동에 대한 검토는 궤도 및 구조물에 작용하는 하중 측면에서 가장 중요한 검토 항목 중의 하나였다. 따라서, 본 연구에서는 2009년 한국에서 최고속도로 주행할 수 있는 차량인 KTX-Sancheon을 이용하여 기존 고속선(광명~대전구간)에서 최고속도 300km/h와 335km/h 주행시험 결과를 토대로, 400km/h이상 속도대역에서의 윤중 변동을 확률론에 기초하여 정량적으로 예측해 보았다.

† 교신저자: 한국철도기술연구원(hong0906@krrri.re.kr)

* 한국철도기술연구원

2. 본 론

2.1 고속선 증속의 개요

2.1.1 고속철도 최대 운행속도의 변화

일본은 1963년 최초로 200km/h를 넘어섰고, 현재는 프랑스가 574.8km/h로 최고속도 기록을 보유하고 있다. 일본은 1996년 시험 최고속도 443km/h에 도달하였고 한국은 2003년 300km/h를 돌파하였고, 최근 HEMU-430X가 421.4km/h를 주행한 바 있다. 중국은 2010년 최고속도 486.1km/h에 도달하였다. 중국은 이후로도 최고속도를 급진적으로 높이고 있다.

고속열차의 속도향상을 위해서는 속도향상에 따른 다양한 불연속 경계에서 발생하는 문제를 해결해야만 한다. 주요한 불연속 경계에는 차륜과 레일 및 전차선과 집전판 경계가 있다. 속도향상 시 차륜과 레일 경계에서 발생할 수 있는 공학적 문제로는 윤중 및 횡압 변동, 차륜과 레일의 마모 및 피로 파괴를 들 수 있다. 이와 같은 문제들은 차량의 주행안전성 및 승차감과 밀접하게 연관되어 있다. 이 각각의 문제들에 대하여 속도향상과의 상관성을 정량적으로 평가하는 것은 속도향상을 위해 필수 불가결한 요소이다

2.1.2 동적윤중의 이론적 배경

열차 증속 시 용접부 등 궤도 결함 개소, 뜬 침목 개소, 연약지반개소 등에서는 필연적으로 추가적인 동적 윤중 증가가 발생하게 된다. 열차가 가 주행할 때 차륜이 레일에 작용하는 힘은 식(1)과 같이 차량에 의한 정적 하중에 열차속도 및 궤도, 궤도 하부의 상태, 즉 궤도 지지구조의 강성에 따라 변화하는 동적 하중의 합으로 결정된다.

$$Q_{tot} = Q_{stat} + Q_{dyn} \quad (1)$$

운영 최고속도 300km/h의 고속열차가 상용화되면서, 많은 연구자들은 300km/h까지의 속도향상 시 동적 윤중에 대하여 연구를 수행한 바 있다. 동적 윤중에 관한 주안점은 크게 세가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로 고속철도와 측방압력의 합력에 대한 안전도를 산정, 그 다음으로 동적 윤중 감소를 통한 철도 구조물 비용 최소화, 마지막으로 수치해석과 실험을 통한 동적 윤중 측정 정확도 향상이 동적 윤중 연구의 주된 관심사이다. 300km/h이상 고속열차의 증속에 따른 동적 윤중 변동을 정량화하기 위한 연구는 일본을 중심으로 동력 분산식 차량에 대한 연구결과와 프랑스를 중심으로 동력 집중식 차량에 대한 다수의 연구 결과가 발표된 바 있다. 고속으로의 증속에도 불구하고 차량 경량화, 특히 스프링 하 질량 저감을 통한 윤중 저감이 유지보수 비용 저감에 큰 효과가 있다는 연구 결과도 있다.

Fig. 1은 과거의 증속에 따른 동적충격계수(Dynamic Impact Factor) 변화에 대한 연구결과로, Central European Railways(1936), Birman(1966), Values measured on vehicles of TGV001(1981)에서 제시한 값이다.

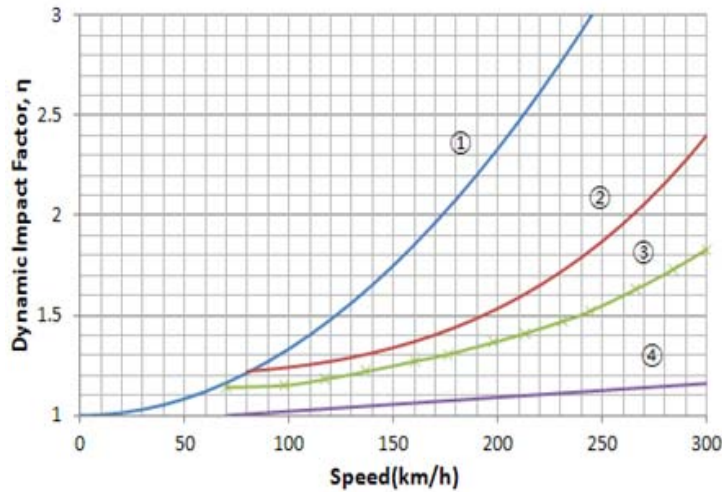


Fig. 1 Variations of DIFs per train speed

- ① : Central European Railways, $\eta = 1 + \frac{V^2}{30,000}$
- ② : Briman's formula, $\eta = 1 + \alpha + \beta + \gamma$, $\alpha = 0.04 \left(\frac{V}{100}\right)^3$, $\beta = 0.2$, $\gamma = \gamma_0 \cdot \alpha \cdot \beta$
 $\gamma_0 = 0.1 + 0.017 \left(\frac{V}{100}\right)^3$
- ③ : Values measured on vehicles of TGV 001
- ④ : Values for theoretical calculation for ideal track and vehicle

2.2 현장 운행 시험

고속열차 증속에 따른 윤중 변동은 차량과 구조물 양측에서 실험적으로 평가할 수 있다. 차량 측에서의 윤중 변동 측정은 데이터를 연속적으로 획득할 수 있는 장점이 있으나, 고속 주행 열차의 데이터 획득 지점을 정확하게 지정하기 어렵고, 데이터 획득을 위하여 윤축을 가공하는데 많은 시간과 노력이 필요하게 된다. 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 측상 가속도를 측정하고, 측상 가속도와 윤중과의 상관 관계를 도출하기 위한 연구가 있었다.

구조물 측에서의 윤중 변동 측정은 데이터 획득 지점을 정확하게 지정할 수 있는 장점이 있으나, 데이터를 연속적으로 획득하기는 어려우며 많은 비용이 소요되는 단점이 있다. 또한, 대상 구조물에 데이터 획득을 위한 센서 설치가 주로 야간의 열차가 운행하지 않는 시간대를 활용하여야 하므로, 이 또한 노력과 비용이 소요되는 일이다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 차륜에 속도계를 부착하여 열차 위치의 정확성을 최대한 향상시키면서 연속적인 데이터를 획득할 수 있는 실 차량 윤축을 활용하여 윤중 변동을 측정하였다.

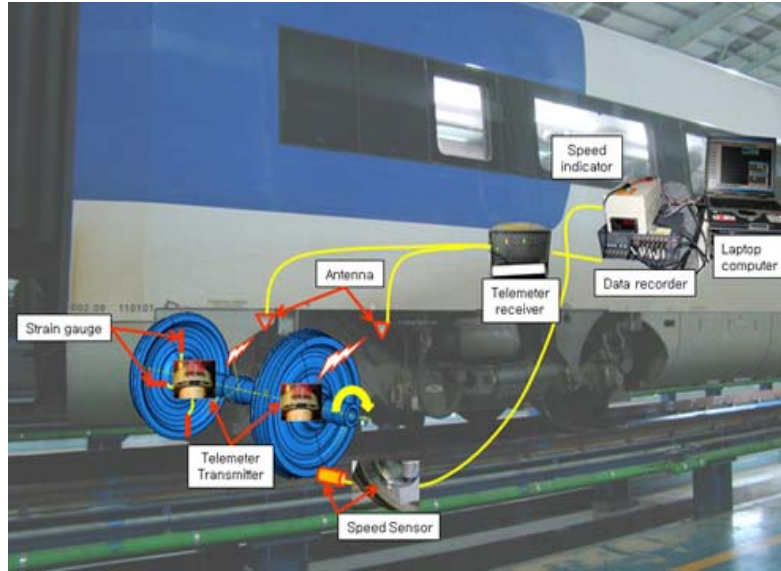


Fig. 2 Telemetry system for data acquisition (KTX-Sancheon)

2.2.1 시험 조건

2009년 8월과 11월에 동 노선의 광명~대전 129.998km 구간 상하행선에서 각 1회, 총 2회 시험을 실시하였다. 시험에는 KTX-Sancheon 실차 2편성을 사용하였다. 시험차는 1량 10편성의 동력 집중식 차량으로, 시험은 만차 상태로 실시하였다. 시험차의 정적 윤중은 만차 상태에서 Down 과 Up line 모두 67.689kN으로, 시험용 윤축의 위치 Fig. 3과 같이 주행 안전성 측면에서 가장 취약한 단부대차를 이용하였다. 실차 시험노선의 주요 궤도형식은 자갈궤도 형식이며, 3개 터널구간 25.2km에 슬래브 궤도가 설치되어 있다.

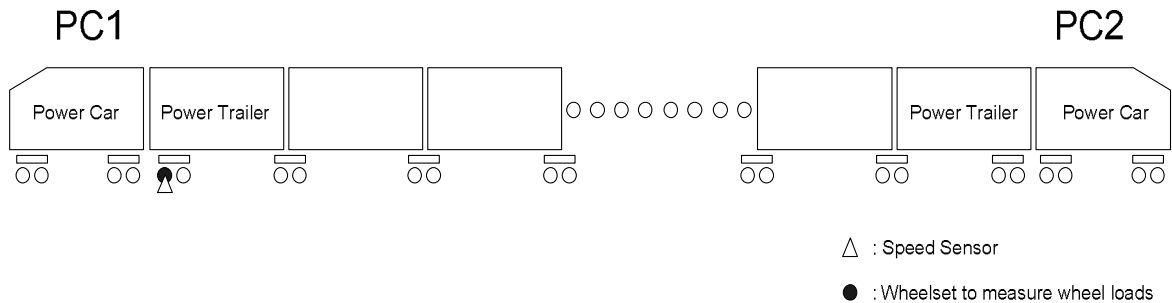


Fig. 3 Position of wheelset to measure wheel loads

2회 시험 시 주행 최고속도는 각각 300km/h(Case1)와 335km/h(Case2)로, Fig. 4는 2회 시험에 대한 주행 거리별 속도 변화도이다. 22km이전과 152km이후는 기존 재래선 구간으로, 주행 속도가 100km 이하로 낮아 분석에서 제외하였다. 선형조건을 최대한 배제하고 증속에 따른 윤중 변동을 평가하기 위하여 전체 구간 중 직선부분만을 추출하여 분석 데이터로 활용하였다.

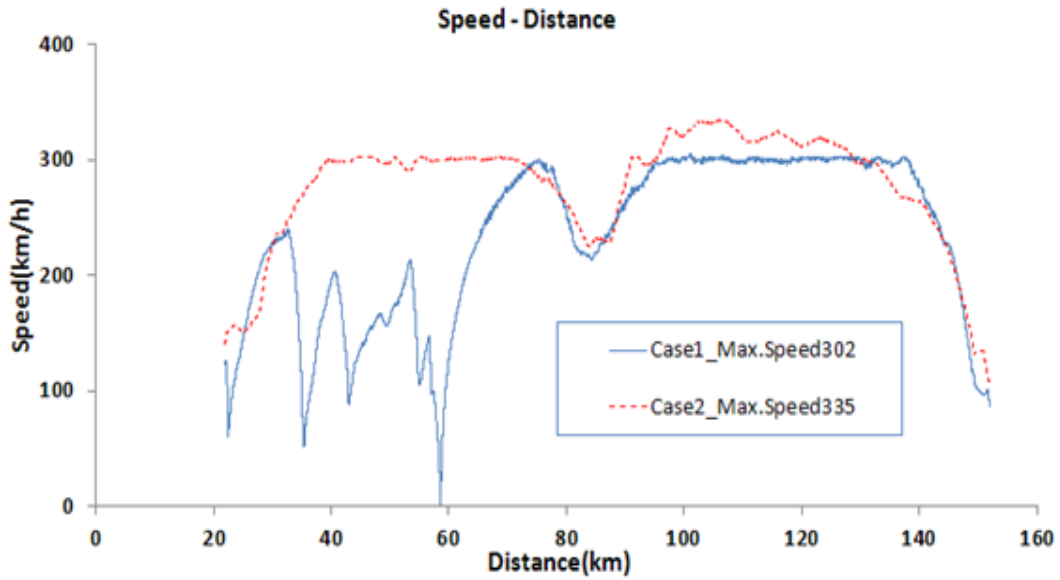


Fig. 4 Running speed and distance diagrams (All sections)

2.2.2 시험 결과

Fig. 5는 직선구간에서의 운중-속도 측정결과이다. 좌우측 차륜에서 각각 측정된 운중 데이터는 증속에 따라 전체적으로 동적 운중이 약간 감소하면서, 변동폭은 점진적으로 증가하는 패턴을 보여주고 있다. Fig. 6은 측정 데이터 중에서 운전 패턴이 상대적으로 양호한 점진적인 증속을 보여주는 Case1의 5구간(63.246~72.603km)에 대한 운중 발생 빈도이다. 좌우측 운중 발생 분포는 정규확률 분포에 가까운 비슷한 패턴을 보였다.

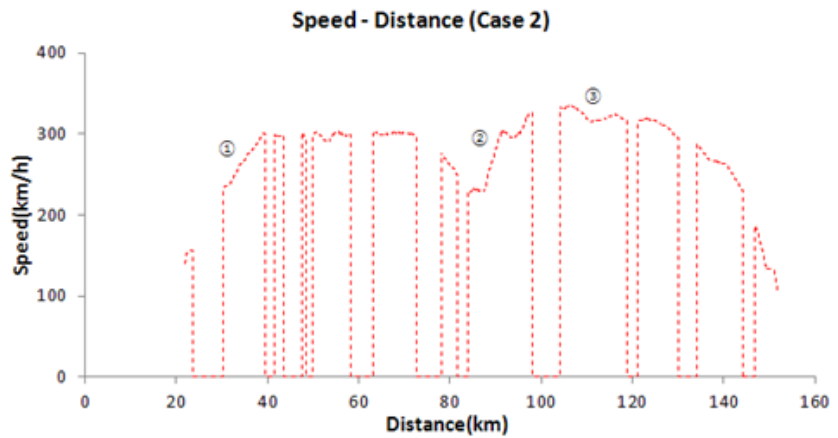
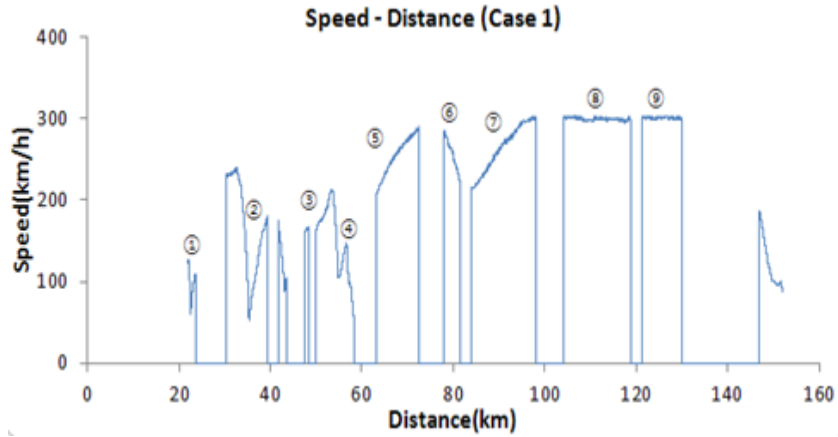


Fig. 5 Speed at straight section

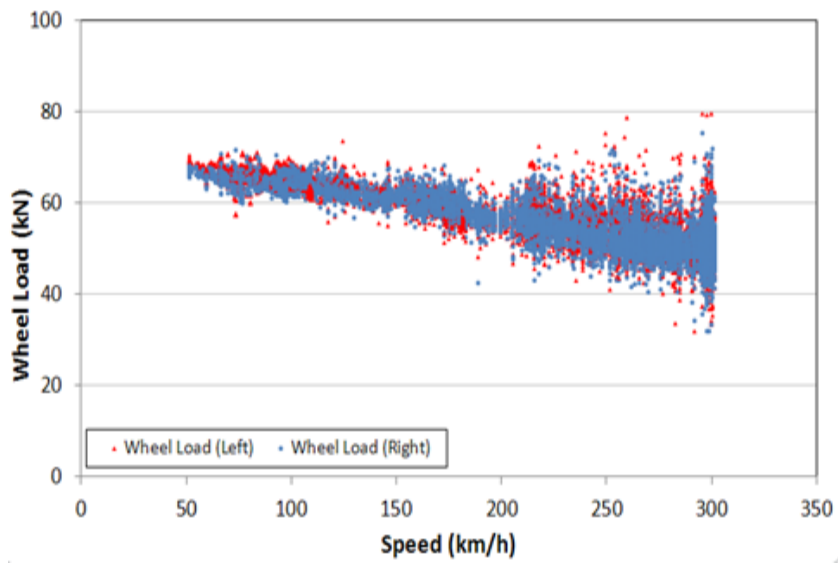


Fig. 6 Wheel load data per the speed (Case 1)

Fig. 7에 5구간(63.246~72.603km)의 윤중 발생 빈도를 나타내었다. 해당 구간은 점진적으로 속도가 증가하는 완만한 운행 구간이었다. 5구간에서 윤중 발생 빈도곡선은 정규확률밀도 함수의 형태를 보인다. 따라서 모든 윤중 데이터를 Gaussian function으로 처리하여 Fig. 7에 나타내었다.

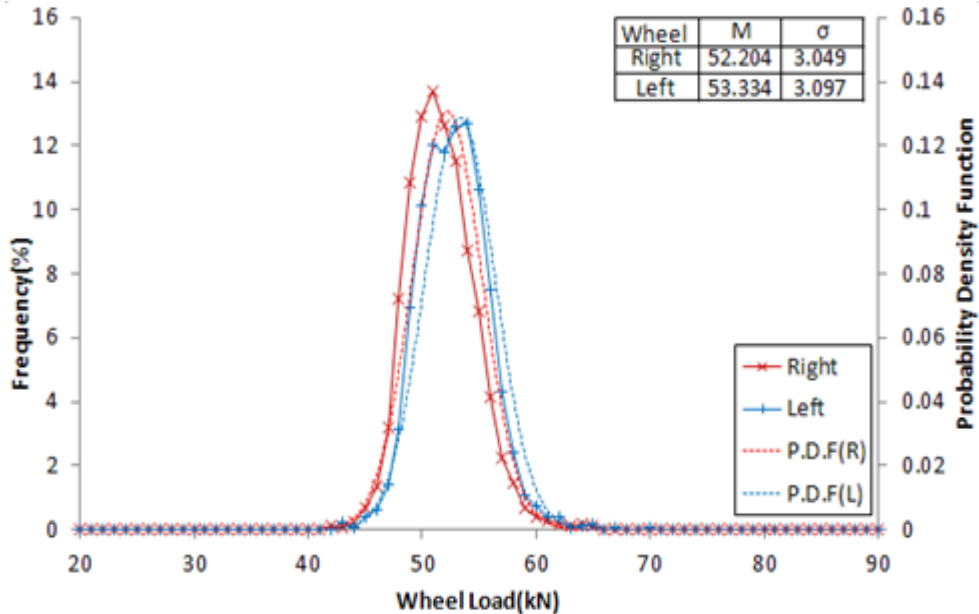


Fig. 7 Normal probability distributions of wheel load

2.3 고속화에 따른 구조물이 윤중 변동에 미치는 영향

302km/h와 335km/h 속도까지의 실 열차 주행시험 결과를 확률적으로 분석하여 윤중 변동과 속도와의 상관 관계를 도출하고자 하였다. 윤중 변동을 정량화하기 위하여 식(2)와 같이 무차원 변수로 정규화 하였다.

$$\text{Wheel Load Fluctuations(WLFs)} = \frac{\sigma \text{ (Standard Deviation)}}{P_{st} \text{ (Static Wheel Load)}} \quad (2)$$

선로 상에 존재하는 구조물이 윤중 변동에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 Fig. 4의 ⑤(점진적 증속구간으로 분기기가 독립적으로 존재)와 ⑨(등속 300km/h)구간에 대한 윤중 변동을 분석하였다.

Fig. 8은 ⑤구간에 대한 증속 시 윤중의 평균값 및 표준편차의 변화를 보여준다.

⑤구간에서 속도에 의한 영향을 배제한 선로 상 분기 기만에 의한 윤중 변동은 분기기가 위치하는 속도대역 ~ 구간에서 예측할 수 있다. 동 구간에서의 분기기에 의한 윤중 변동은 정적 윤중의 몇 %에 해당되는 것을 Fig. 8로부터 알 수 있었다.

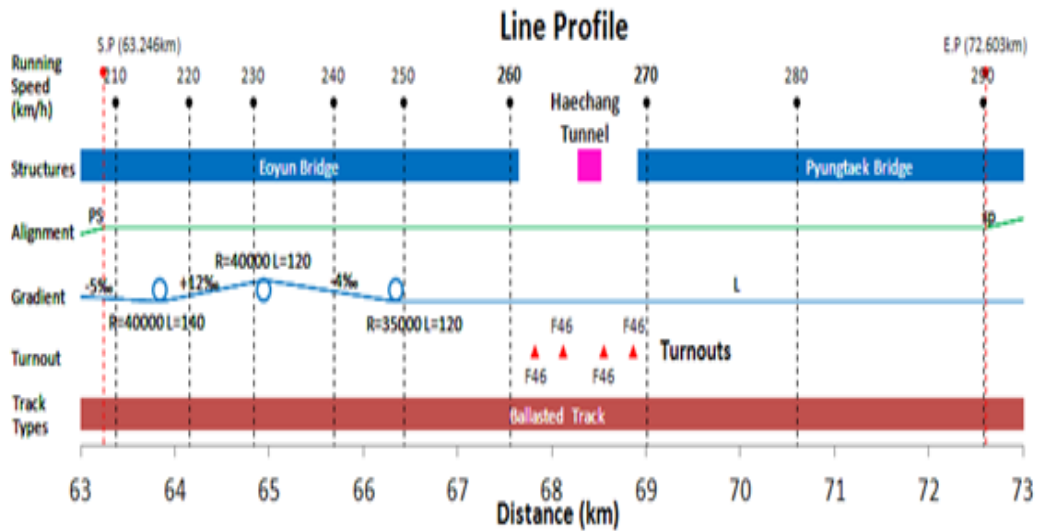
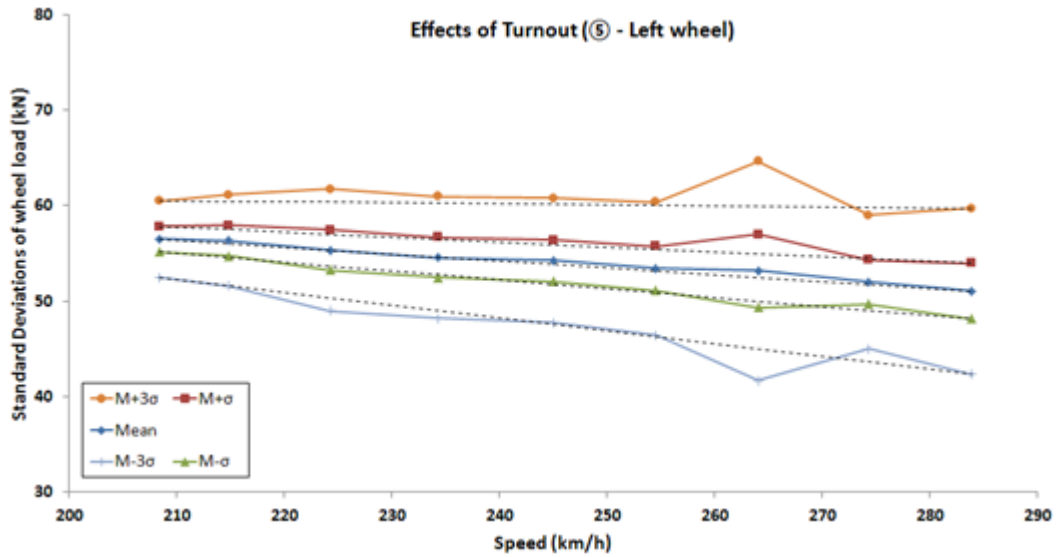


Fig. 8 WLFs affected by turnouts and transition zones

Fig. 9에서는 등속 ㉔구간에 대한 윤중 변동이 큰 개소(3σ 외부)와 구조물 위치를 비교해 보았다. 분기기 위치에서 상대적으로 큰 윤중 변동을 보였으며, 그 다음으로 구조물 접속부와 교량 상 뜬 침목이 주요 윤중 변동의 원인인 것으로 파악되었다. 분기기 개소의 경우 윤중 감소도 크게 발생되어 탈선 평가 시 가장 주의해야 할 개소임을 알 수 있었다.

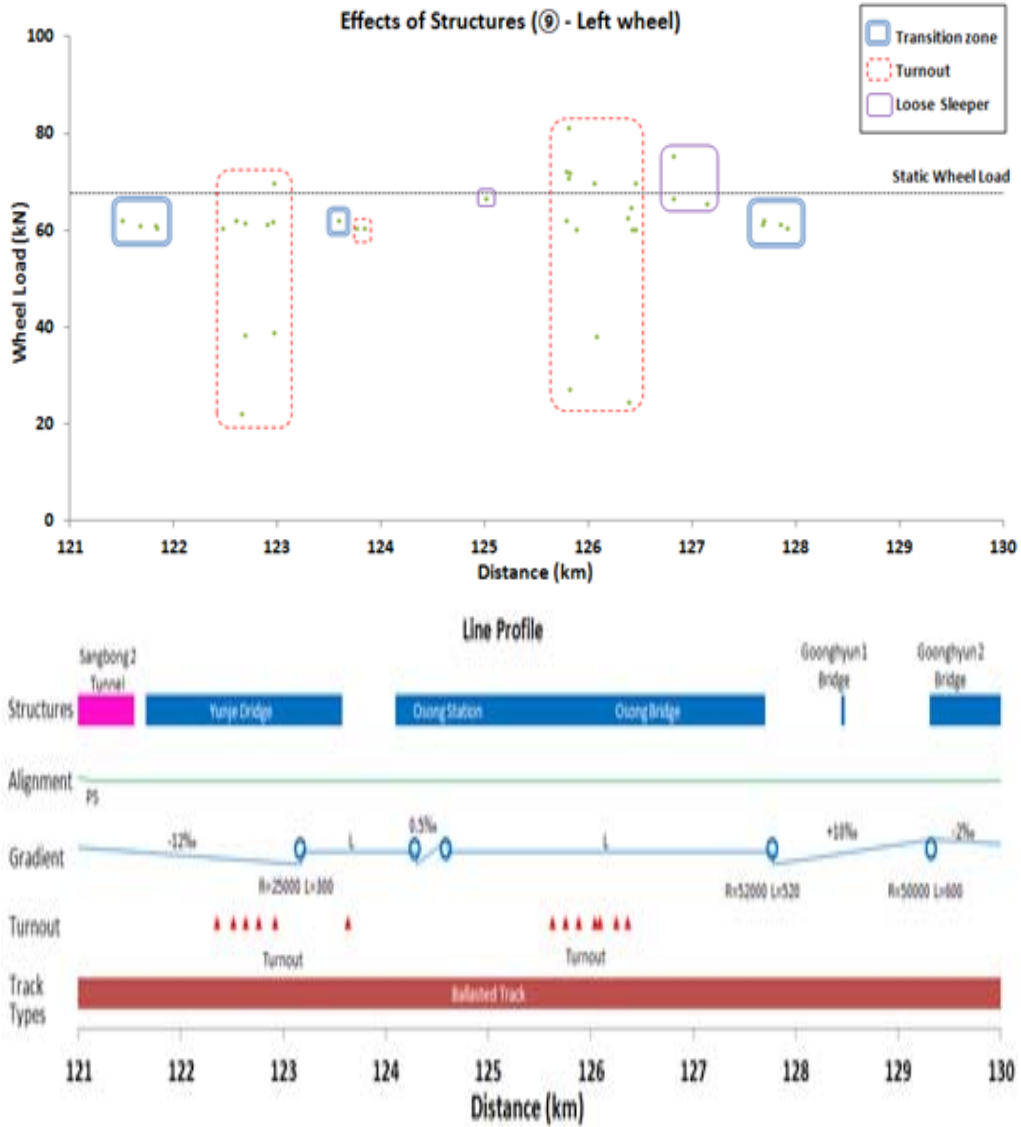


Fig. 9 WLFs affected by structures (wheel load data larger and smaller than 3σ).

3. 결론

경부 고속선(광명~대전 129.998km구간)에서 KTX-Sancheon 차량을 이용하여 최고속도 300km/h와 335km/h로 2회 주행 시 속도 증감에 따른 윤중 변동을 무선 데이터 송수신 기법을 활용하여 측정하였다. 이를 토대로 고속대역에서의 윤중 변동(σ/Pst)을 속도의 함수로 예측한 결과는 다음과 같다.

- 1) 구조물이 윤중 변동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 속도 영향을 배제한 구조물만의 윤중 변동을 평가하였다. 그 결과 분기기 및 구조물 접속부가 동적 윤중 변동에 미치는 영향은 각각 +6.96% 와 -4.93% 로 평가되었다.
- 2) 윤중 변동에 대한 연구결과는 400km/h 이상 속도대역에서의 주행안전성 평가, 기존 고

속선 인프라 보강 필요성 여부 판단, 운중 저감을 통한 유지보수비용 최소화에 활용될 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1] D.S. Kim, Y.S. Ham, et al.(2011) Development of Interface Technology on Catenary/Pantograph and Vehicle/Track to Speed up High Speed Train, KRRI.
- [2] C. Esveld. (2001) *Modern Railway Track*, MRT Productions, Second Edition, The Netherlands.
- [3] B. Lichtberger. (2005) *Track Compendium*, Eurail Press, Germany.
- [4] Design code for railway structures(in Japanese), RTRI, 1997.
- [5] M.C Kim, D.S. Kim, S.Y. Jang, et al.(2009) Report for the track/trackbed safety check to speed up Gyungchun line, KRRI.