

◆ 특집 ◆ 철도차량의 주행안전성 평가 기법

고속철도 차량의 후미 횡진동 특성 및 저감방안에 관한 연구

Study on Reduction Method and Characteristic of Lateral Vibration of the Tail Car in a High Speed Train

김재철^{1,✉}, 권석진¹
Jae Chul Kim^{1,✉} and Seok Jin Kwon¹

¹ 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-Speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)
✉ Corresponding author: jckim@krri.re.kr, Tel: +82-31-460-5206

Manuscript received: 2014.7.24 / Revised: 2014.8.13 / Accepted: 2014.8.18

During the acceptance test of KTX, unexpectedly great lateral vibration in 14th~16th train at 150km/h~200km/h was appeared on a straight line in the winter season. Generally, stiffness of secondary suspension in KTX vehicle is one of the most sensitive components on air temperature. So, we examined that the secondary suspension to be mounted heating system was able to reduce the lateral vibration in the tail car of KTX. Also, we verified that lateral vibration from test results on KTX train with wheel conicity 1/20 disappeared. In this paper, we analysis effective reduction methods and the cause of the lateral vibration using model of KTX train and compare with the test results. The analysis results agree well with test ones. From mode analysis result, lateral vibration is occurred at natural frequency range 0.5~0.6Hz with a negative damping value and its natural frequency disappear gradually according to increasing of wheel concinicy.

Key Words: High-Speed Train (고속차량), Lateral Vibration (횡 진동), Korea Train Express (KTX), Wheel Conicity (차륜달면구배)

1. 서론

2004년 4월 KTX가 성공적으로 개통되어 국내에서도 고속철도시대가 열리게 되었다. 그러나 개통 전 KTX 시운전 단계에서 고속철도에 대한 기술이 아직 완성단계에 이루지 못해서 많은 어려움이 있었다. 그 가운데에서도 동절기 운행 시 KTX 차량의 후미에서 커다란 횡진동이 발생하여 개통 전까지 심각한 문제로 대두되었다. 고속차량에 대

한 횡 진동 문제는 일본의 신간선에서도 후미부에서 커다란 횡 진동이 발생하여 횡댐퍼를 이용하여 문제를 해결하였다.¹

이러한 후미부 횡진동은 KTX와 발생현상이 유사하지만, 발생조건이 다르게 나타나고 있으며, 특히 KTX는 일본 신간선 차량과는 다르게 하나의 대차가 2대의 차체와 연결되는 관절형 방식으로 차량간 운동의 연성이 크다는 특징이 있으며, 차량수도 20량에 해당하는 장대화된 편성으로서 구

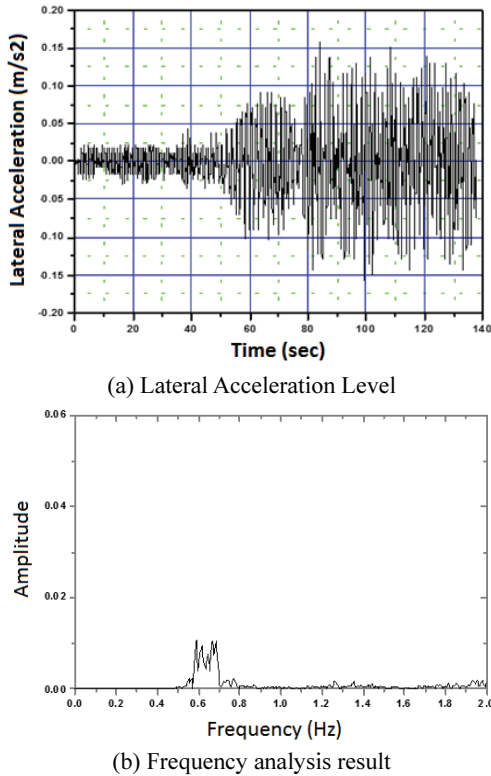


Fig. 1 Lateral vibration in 16th train from 140km/h to 200km/h

성되어있기 때문에. 일반차량에서는 보기 어려운 다수의 편성진동 형태가 발생한다. 따라서, 본 연구에서는 KTX 20량 1편성을 모델링하여 후미 횡진동에 대한 원인규명을 하였으며, 후미 횡진동 문제를 해결할 수 있는 방안에 대해서 검토를 하여 가장 효과적 대책방안을 제시하였다.

2. KTX 차량 후미 횡진동 현상 및 해석²

2.1 KTX 차량 후미 횡진동 현상

개통 전 동절기에 KTX 시운전 중에 차량의 속도가 150km/h 이상의 속도영역에서 후미부 차량에서 횡진동이 크게 발생하면서 기준치(0.183m/s)를 초과하였다. 횡진동의 발생조건은 동절기 직선구간에서 약 150km/h ~ 200km/h의 속도영역에서 20량 가운데 14 ~ 17번째 차량에서 가장 크게 발생하며, 0.5Hz ~ 0.6Hz사이의 주파수 영역에서 진동하는 현상을 보였다. Fig. 1은 경부고속철도구간에서 KTX 차량이 약 140km/h ~ 200km/h의 속도로 주행시 16

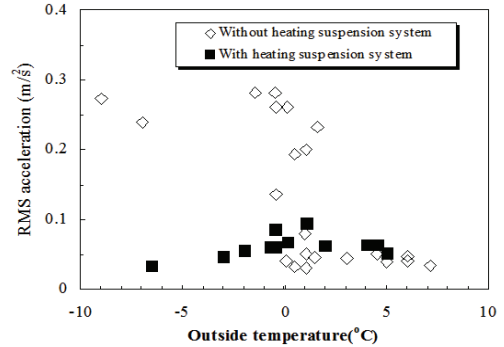


Fig. 2 Influence of heating system on lateral vibration in 17th train at 170km/h according to changing of outside temperature

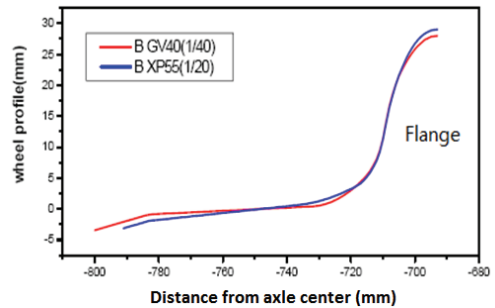


Fig. 3 Wheel profiles of GV40 and XP55

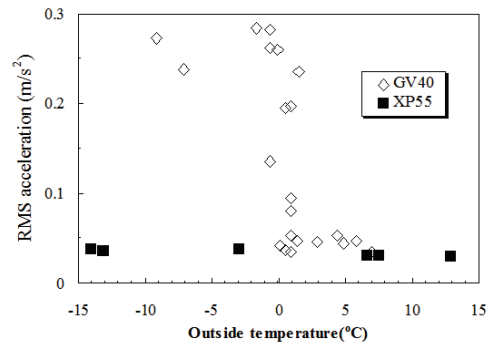


Fig. 4 Influence of wheel profile on lateral acceleration in 17th train at 170km/h according to changing of outside temperature

번째 차량 차체바닥 중심에서 측정된 좌우방향 진동시험결과이다.

이러한 횡진동이 동절기에 발생하는 점에 주목하여 대기온도에 가장 민감하게 영향을 받는 공기 스프링에 가열장치를 장착하여 시험한 결과 Fig. 2

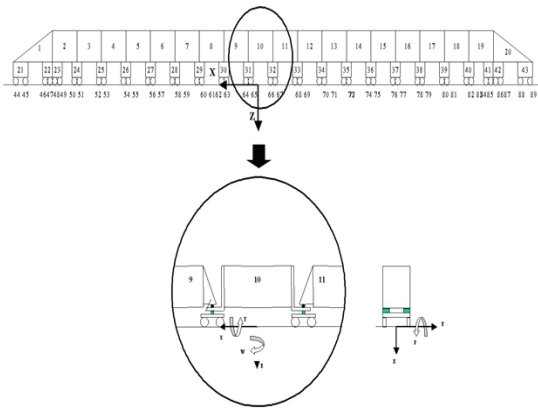


Fig. 5 Numerical analysis model of KTX

와 같이 차체의 후미 횡진동이 감소하는 경향을 나타냈다, 그러나 대기온도가 약 -10°C 정도의 혹한기에는 가열장치에 관계없이 횡진동이 발생하는 것을 알았다. 따라서, KTX 차량의 횡진동 문제는 2차 현가장치인 공기스프링의 강성변화에 커다란 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 횡진동은 직선구간에서만 발생하고 곡선구간에 진입하면서 횡진동이 사라지는 현상으로부터 차륜과 레일에 의한 동역학적 관계를 고려하여, Fig. 3과 같이 차륜의 답면경사를 1/40(GV40)에서 1/20(XP55)로 변경하여 시험한 결과 Fig. 4와 같이 후미부의 횡진동이 발생하지 않는 것을 확인하였다.

2.2 KTX 차량의 횡진동 해석

KTX 차량의 후미 횡진동 특성 및 원인을 파악하기 위해서 Fig. 5와 같이 동력차 + 동력객차 + 객차(16량) + 동력객차 + 동력차 20량으로 모델링하였다. KTX 대차는 동력차용 대차 4대, 동력객차용 대차 전후 2대 및 동력객차와 객차, 객차와 객차를 연결하는 관절대차 17대로 구성되어있으며. 차체간 연결장치는 동력차와 동력객차 사이의 경우 상대운동 시 발생하는 충격을 완충하는 버퍼와 견인력을 전달하는 기어로 구성되어 있고, 객차와 객차사이에는 곡선주행에서 발생하는 객차사이의 상대운동을 허용할 수 있는 구조인 고정링과 이동링에 의한 연결장치, 관절 연결장치 및 댐퍼 연결장치로 구성되어 있다.

수치해석은 영국 AEA에서 개발한 철도 차량 동역학 전용해석 프로그램인 VAMPIRE를 이용하여 수행하였으며, 해석구간은 경부고속철도구간(서울기점 106.3km~123.3km)의 궤도틀림 검측데이터

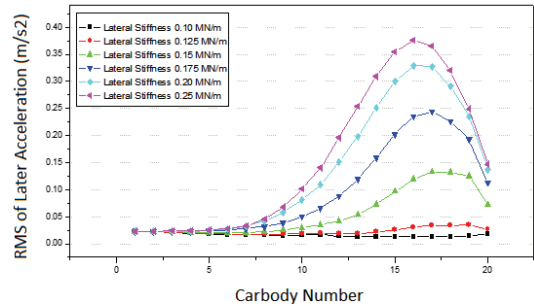
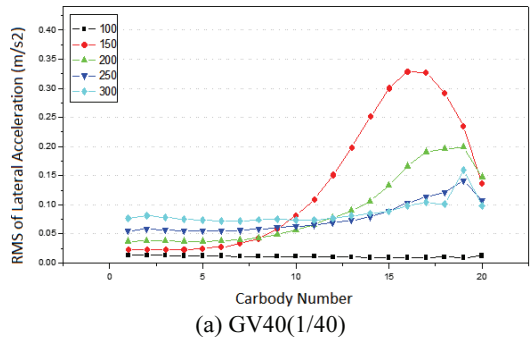
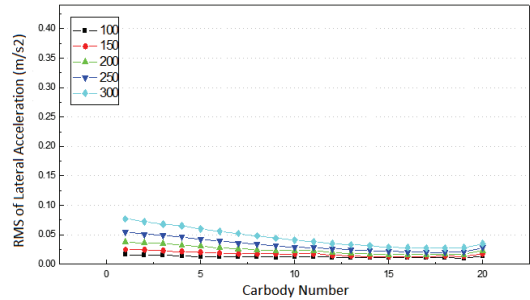


Fig. 6 Calculation results of lateral acceleration at 150km/h according to changing of secondary suspension stiffness



(a) GV40(1/40)



(b) XP55(1/20)

Fig. 7 Calculation results of lateral vibration for KTX with GV40 and XP55 profile at 150km/h (A/S Stiffness : 0.2MN/m)

를 VAMPIRE에서 요구하는 궤도입력 조건으로 변환하여 수치해석을 수행하였다.

KTX 차량의 차체, 대차, 현가장치 및 연결장치의 기계적 특성치는 프랑스 ALSTOM사의 자료를 이용하였으며, 자세한 내용은 문헌 2에 수록되어있다.

Fig. 6은 KTX 차량이 150km/h의 속도로 직선구간 통과 시 공기 스프링의 횡 방향 강성 변화에 따른 각 차호별 횡 방향 진동 가속도에 대한 계산

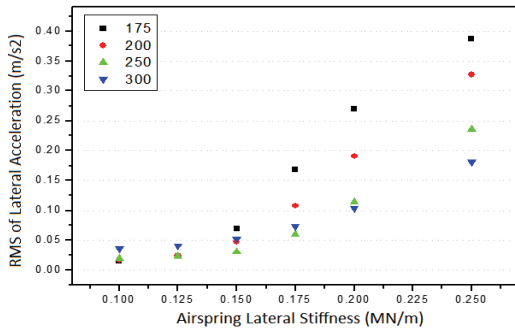


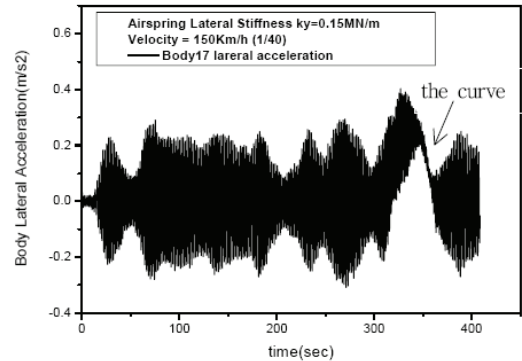
Fig. 8 Calculation results of lateral vibration in 17th train on air spring stiffness and train speed

결과이다. 공기 스프링의 횡 방향 강성이 0.1MN/m 과 0.125MN/m에서는 횡 진동이 발생하지 않았지만, 0.15MN/m부터 차량의 후미에서 횡 진동이 발생하면서, 횡 방향 강성이 증가할수록 횡 진동의 크기가 급격하게 커지는 것을 알 수 있다. 또한 차량의 후미부로 갈수록 커지다가 17번째 차체를 지나면서 다시 감소하는 경향을 보이고 있다.

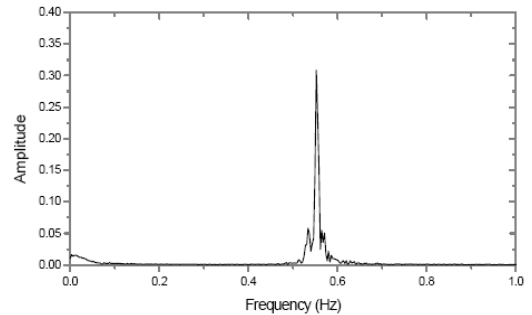
Fig. 7은 KTX 차량의 공기스프링의 횡 방향 강성이 0.2MN/m인 경우 GV40(1/40) 차륜과 XP55 (1/20) 차륜에 대해서 속도변화에 따른 차호별 횡 방향의 진동에 대한 해석결과를 나타내고 있다. 이 결과로부터 XP55(1/20)차륜의 경우에는 횡 진동이 발생하지 않지만, GV40(1/40)차륜의 경우에는 횡 진동이 발생하는 것을 알 수 있으며, 100km/h의 속도에서는 안정한 값을 나타내지만 차량속도가 150km/h로 증가하면 횡 방향 진동의 크기가 증가하여 불안정해지고 다시 속도가 250km/h 이상으로 증가하면 기준치 이하로 안정화되는 것을 알 수 있다. 또한 250km/h 이상의 속도영역에서는 19번째 동력객차의 횡 진동이 다른 차량에 비해서 약간 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 차량속도와 공기 스프링 횡 강성 변화에 따른 17번째 차량의 차체에 대한 횡 진동 값이다. 횡 강성이 0.175MN/m 이상이며, 중.고속 영역 (150km/h ~ 200km/h)에서는 횡 진동이 큰 것을 알 수 있으며, 전체적으로 공기 스프링의 횡 강성이 증가하면 횡 진동의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9(a)는 경부고속철도 시험선 구간 (서울기점: 106.3 km ~ 123.3km, 곡선구간: R=7000m)에 대한 해석결과이다. 횡 강성이 0.15MN/m인 경우 150 km/h로 주행 시 GV40(1/40) 차륜에 대한 17번째 차체의 횡 가속도로서 직선구간에서만 횡 진동이



(a) Acceleration level



(b) Frequency analysis

Fig. 9 Lateral vibration in 17th train at 150km/h (A/S stiffness: 0.15MN/m)

발생하고, 곡선구간에서는 발생하지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 Fig. 9(a)의 결과에서 직선구간에 대한 차체의 횡 방향 진동 가속도의 주파수 분석 결과이다. 약 0.55Hz의 주파수 성분을 갖고 있는 것을 알 수 있다.

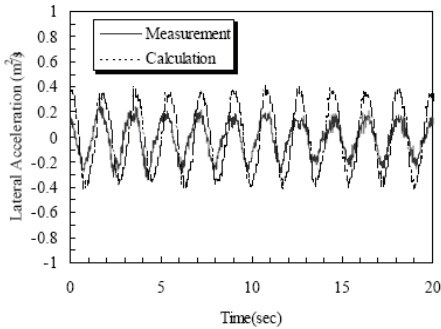
3. 횡 진동 시험과 계산결과의 비교 및 검토

3.1 횡 진동 시험과 해석결과의 비교

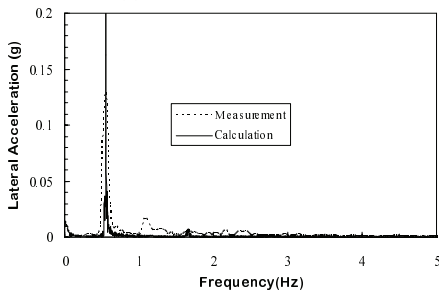
전철에서 KTX 차량의 횡 진동에 대한 계산결과의 타당성과 원인을 분석하기 위해서 실제 KTX 차량 주행 시 측정된 시험결과와 해석결과를 비교 검토하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 공기 스프링의 횡 방향 강성이 0.2MN/m인 경우 19번째 차체의 GV40차륜에 대한 진동가속도의 해석결과와 측정결과에 대한 비교이다.

이 결과로부터 해석과 측정결과가 거의 유사한 것을 알 수 있으며, 차량속도 150km/h에서 횡진동 발생 주파수는 약 0.55Hz의 성분을 갖고 있는 것

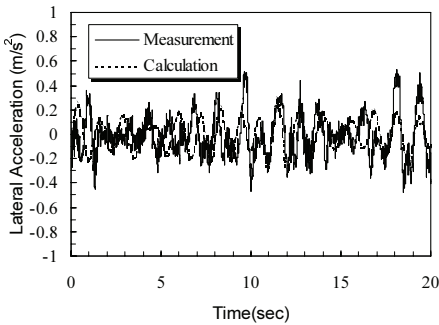


(a) Acceleration level

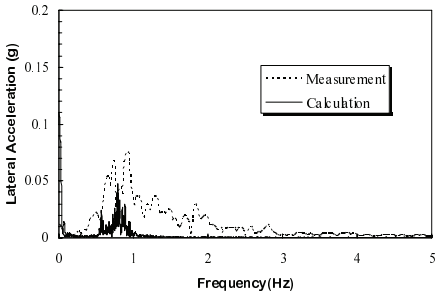


(b) Frequency analysis

Fig. 10 Comparison of calculation results and measurement in 19th train body at 150m/h

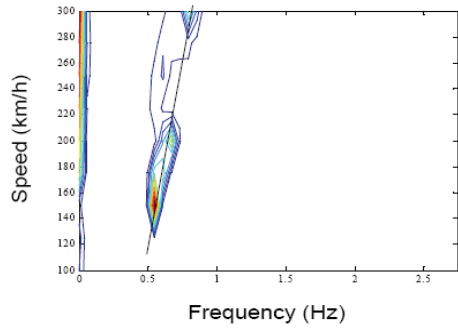


(a) Acceleration level

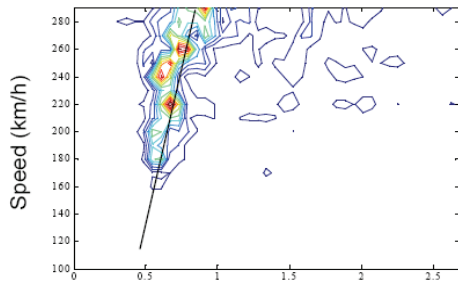


(b) Frequency analysis

Fig. 11 Comparison of calculation results and measurement in 19th train at 300km/h



(a) Calculation



(b) Measurement

Fig. 12 Frequency analysis of lateral vibration in 19th train according to increasing of train speed

을 확인할 수 있다. 또한 300km/h에서는 주파수가 약 0.8Hz~1Hz의 주파수 성분을 갖고 있으며, 이 주파수 성분은 Fig. 7의 해석결과에서 후미 동력차에서 발생하는 진동에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 12는 위의 결과를 이용하여 차량속도와 주파수 변화에 따른 횡방향 진동의 크기를 나타내고 있다.

3.2 KTX 차량의 모우드 해석결과

철도차량 해석 시 차륜과 레일의 접촉력에 의해서 차량의 진동특성이 속도와 차륜의 답면구배에 따라 변하며, 차량의 고유진동수에서 감쇠 값이 음으로 나타날 경우 진동이 급격히 커지는 불안정한 상태가 된다. 따라서 모우드 해석을 통한 KTX 차량의 고유진동수와 감쇠 값을 계산하였다.

Fig. 13은 KTX 차량의 공기스프링의 횡방향 강성이 0.15MN/m인 경우 차륜의 답면구배와 속도변화에 따른 감쇠 값을 나타내고 있으며, Fig. 14는 차륜 답면구배 XP55 (1/40)을 갖는 차량이 150km/h의 속도로 주행 시 0.55Hz의 고유진동수에 대한 모우드 형상을 나타내고 있다.

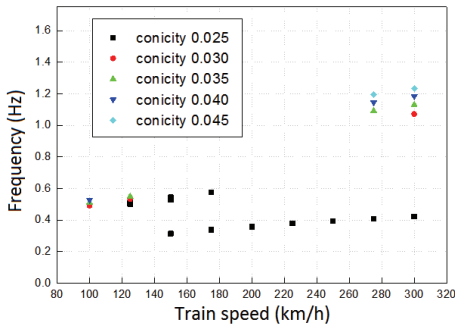


Fig. 13 Frequency of unstable modes according to changing of wheel conicity (A/S stiffness: 0.15 MN/m)

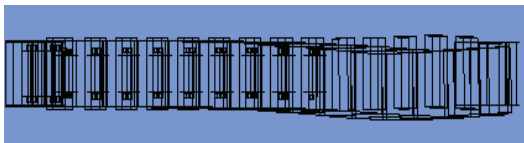


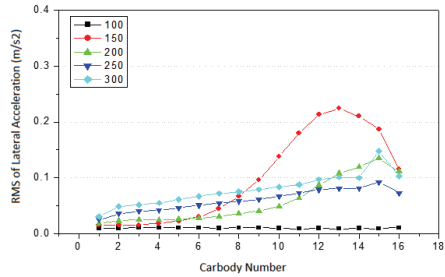
Fig. 14 Mode shape of KTX vehicle at 0.55Hz (150 km/h, conicity: 1/40)

이 결과로부터 차륜의 답면구배가 1/40인 경우에는 차량의 속도가 약 120km/h ~ 180km/h 구간에서 0.5Hz ~ 0.6Hz의 음의 감쇠 값을 갖는 고유진동수가 존재하며, 차륜의 답면구배가 증가할수록 KTX 후미 횡 진동을 발생시키는 고유진동수의 음의 감쇠 값이 점차 사라지고 1Hz 이상의 고유진동수가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, KTX 차량 후미부에서 발생하는 횡진동은 약 120km/h ~ 200km/h 속도영역에서 발생하는 0.5Hz ~ 0.6Hz 사이의 고유진동수의 감쇠 값이 음의 영역에 존재할 때 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

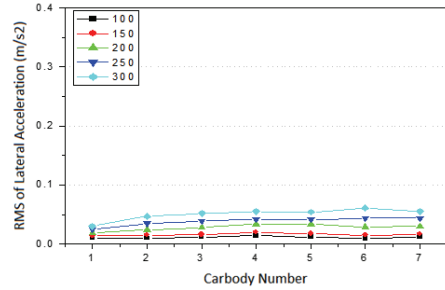
3.3 차량 길이에 따른 횡 진동 해석결과

KTX 차량은 프랑스 TGV와는 달리 1편성이 20량으로 구성되어있기 때문에 장대화된 편성이 횡진동에 커다란 영향을 미칠 가능성이 큰 것으로 판단된다. 따라서 Fig. 15와 같이 KTX 차량의 길이를 변화시키면서 차량의 횡 진동을 계산하였다. 16량의 경우 20량과 동일한 진동 형태를 나타내고 있으나, 진폭의 크기가 20량보다는 작게 나타나고 있으며, 7량의 경우는 횡 진동이 전혀 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 16은 차륜 답면구배 1/40에 대한 차량 길이에 따른 고유진동수의 감쇠 값을 나타내고 있다.

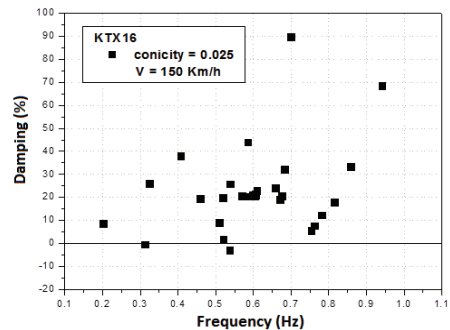


(a) 16 cars

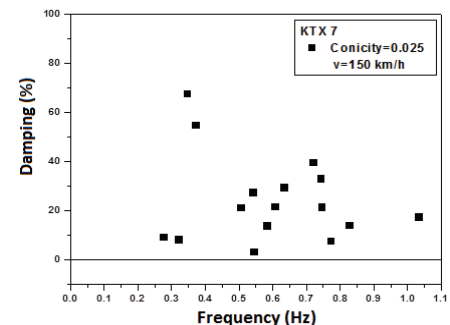


(b) 7 cars

Fig. 15 Lateral vibration level according to the change of train length (A/S stiffness: 0.2MN/m, 1/40)



(a) 16 cars



(b) 7 cars

Fig. 16 Modal damping values according to the change of train length (A/S stiffness: 0.2MN/m, conicity 1/40)

16량의 경우는 20량과 동일하게 음의 값을 갖는 고유진동수가 존재하고 있지만, 7량의 경우에는 음의 감쇠 값을 갖는 고유진동수가 존재하지 않는다. 따라서, KTX 1편성당 길이를 10량으로 하면 0.5Hz ~ 0.6Hz 사이의 음의 감쇠 값을 갖는 고유진동수가 존재하지 않기 때문에 횡 진동이 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

4. 결론

KTX 후미차량 횡 진동에 대한 원인분석 및 효율적인 대책방안을 제시 하기 위해서 KTX 20량 편성을 모델링하여 수치해석을 수행하여 실험과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) KTX 차량의 횡 진동은 동절기 직선구간 주행 시 약 140km/h ~ 200km/h의 속도영역과 14번째 ~17번째 차량에서 가장 크게 나타나며, 약 0.5Hz ~ 0.6Hz 사이의 주파수 특성을 갖는다.
- 2) 대기온도에 가장 민감한 영향을 받는 2차현가 장치에 강성을 낮추기 위해서 가열장치를 부착하여 시험한 결과 횡방향 진동을 감쇠시킬 수 있다는 것을 알았다.
- 3) 차륜의 답면구배를 GV40(1/40)에서 XP55(1/20)로 변경하면, 횡방향 진동이 발생하지 않는 것을 현차시험을 통해서 확인 하였다.
- 4) 횡 진동에 대한 수치해석결과 이러한 횡 진동 발생은 2차 현가장치의 횡 방향의 강성이 증가할수록 KTX 차량의 후미 횡 진동이 증가 하는 것을 알았으며, 현차시험에서 측정된 횡 진동 발생 현상과 잘 일치하였다.
- 5) 차량의 속도가 150 km/h일 경우 횡진동은 약 0.55 Hz에서 나타났으며, 차량의 속도가 200 km/h 이상의 영역에서는 후미 횡 진동이 사라지고, 약 300 km/h에서는 후미 동력차의 좌우진동이 0.8Hz ~ 1Hz 주파수 성분에 의해서 커지는 것을 알았다.
- 6) 모우드해석 결과 횡 진동을 발생 시키는 고유 주파수영역에서 음의 감쇠 값을 가지며, 이때 발생하는 고유진동수의 모우드 형상은 KTX 횡 진동 현상과 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 차륜의 답면구배가 증가할수록 후미 횡 진동을 발생시키는 고유진동수에 대한 음의 감쇠 값이 점차 사라지며, 답면구배 GV(1/20)인 경우에는 음의 감쇠 값이 존재하지 않으면서 횡 진동이 발생하지 않는 것을 알았다.
- 7) KTX 차량은 20량 1편성으로 구성되어 있지만, 차량의 길이를 10량 이하로 하면 0.5 Hz ~ 0.6 Hz 사이의 음의 감쇠 값을 갖는 고유진동수가 존재하지 않기 때문에 횡 진동이 발생하지 않는다.
- 8) 따라서, KTX 후미 차량 횡 진동은 차량의 고유진동수의 감쇠 값이 음의 영역에 존재하면서 발생하는 모우드에 의한 것으로 판단된다.
- 9) KTX 후미 차량 횡 진동에 대한 대책방안은 차륜의 답면구배를 GV40(1/40)에서 XP55(1/20)으로 변화시키거나, 차량의 1편성당 길이를 10량 이하로 설계하는 것이 가장 효율적이라고 판단 된다.

REFERENCES

1. Fujimoto, H. and Miyamoto, M., "Measures to Reduce the Lateral Vibration of the Tail Car in a High Speed Train," Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 210, No. 2, pp. 87-93, 1996.
2. Kim, J. C., Kang, B. B., Koo, D. H., Lee, C. W., Seo, J. W., et al., "A Study on Running Performance for KTX," Korea Rail Network Authority, 2003.