

# KTX차량의 후미 횡 진동에 관한 연구

## A Study on Lateral Vibration at the Tail of Train for KTX

김재철\* · 이찬우\*\*

Jae Chul Kim, and Chan Woo Lee

**Key Words** : High Speed Train(고속차량), 횡 진동(Lateral Vibration), KTX,

### ABSTRACT

During the acceptance test of KTX, lateral vibration of carbody at the tail of the train was found. The carbody lateral vibration was occurred on a straight line in the winter season.

We analysis to find the cause of the lateral vibration and the countermeasure. The analysis results show that lateral stiffness of air spring is the most important parameter to cause the carbody lateral vibration. The lateral vibration is occurred at frequency range 0.5~0.6Hz with a negative damping value. We also know that natural frequency of lateral vibration increase with the train speed up to 1Hz at 300km/h.

### 1. 서 론

2004년 4월 KTX가 성공적으로 개통되어 국내에서도 고속철도시대가 열리게 되었다. 그러나 개통 전 KTX 시운전 단계에서 고속철도에 대한 기술이 미흡하여 많은 어려움이 있었다. 그 가운데에서도 동절기 운행 시 KTX차량의 후미에서 커다란 횡 진동이 발생하여 개통 전까지 심각한 문제로 대두되었다. 고속차량에 대한 횡 진동 문제는 일본의 신칸센에서도 후미부에서 횡 진동이 문제가 되어서 댐퍼를 이용하여 문제를 해결하였다<sup>(1)</sup>. 그러나 발생현상이 KTX의 경우와 유사하지만, 발생조건이 다르게 나타나고 있다.

KTX는 하나의 대차가 2대의 차체와 연결되는 관절형 방식으로 차량간 운동의 연성이 크다는 특징이 있으며, 편성량수도 20량에 해당하는 장대화된 편성으로서 구성되어 있기 때문에, 일반차량에서는 보기 어려운 다수의 편성진동 형태가 발생한다<sup>(2)</sup>.

따라서 본 연구에서는 KTX 20량 1편성을 모델링하여 후미 횡 진동에 대한 원인규명을 하였으며, 후미 횡 진동 문제를 해결할 수 있는 방안에 대해서 검토를 하여 가장 효과적 대책방안을 제시하였다.

### 2. KTX 후미차량 횡 진동 현상 및 해석결과

#### 2.1 KTX 후미차량 횡 진동 현상

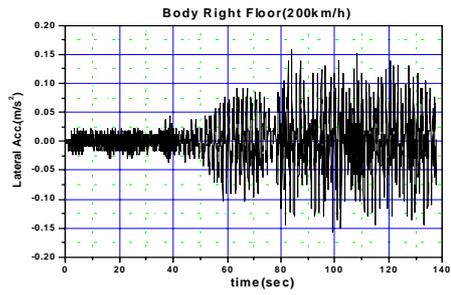
개통 전 동절기에 KTX 시운전 중에 차량의 속도가 150km/h이상의 속도영역에서 후미부 차량에서 횡 진동이 크게 발생하면서 기준치(0.183m/s)를 초과하였다. 횡 진동의 발생조건은 동절기 직선구간에서 약150km/h ~200km/h의 속도영역에서 20량 가운데 14번째~17번째 차량에서 가장 크게 발생하며, 0.5Hz~0.6Hz사이의 주파수 영역에서 진동하는 현상을 보였다. Fig.1은 경부고속철도구간에서 KTX 차량의 후미 객차의 차체바닥 중심에서 측정된 좌우방향 진동시험결과이다.

이러한 횡 진동이 동절기 특히 대기온도가 약10°C이하의 온도조건에서만 발생하는 점에 주목하여 대기온도에 가장 민감하게 영향을 받는 공기스프링에 가열장치를 장착하여 시험한 결과 Fig.2와 같이 차체의 후미 횡 진동이 감소하는 경향을 나타냈지만 혹한기에는 가열장치를 장착하더라도 횡 진동이 발생하는 것을 알았다. 따라서, KTX차량의 횡 진동 문제는 2차 현가장치인 공기스프링의 강성변화에 커다란 영향을 받는 것을 확인하였다.

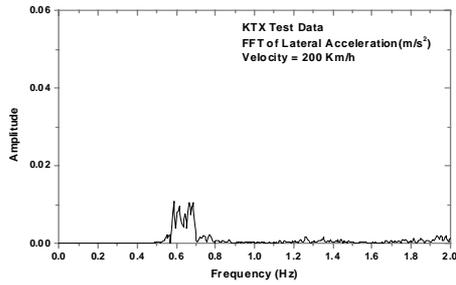
위에서 언급한 것과 같이 횡 진동은 직선구간에서만 발생하고 곡선구간에 진입하면 횡 진동이 사라지는 현상으로부터 차륜과 레일에 관계를 고려하여, 차륜의 담면경사를 1/40(GV40)에서 1/20(XP55)로 변경하여 시험한 결과 Fig.4와 같이 후미부의 횡 진동이 발생하지 않는 것을 확인하였다.

\* 한국철도기술연구원  
E-mail : jckim@krri.re.kr  
Tel: (031) 460-5206, Fax: (031) 460-5279

\*\* 한국철도기술연구원



(a) Acceleration Level



(b) Frequency analysis result

Fig. 1 Carbody lateral vibration of KTX at 200km/h

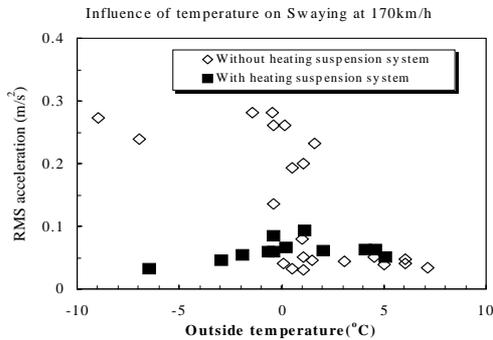


Fig.2 Influence of temperature on lateral vibration at 170km/h

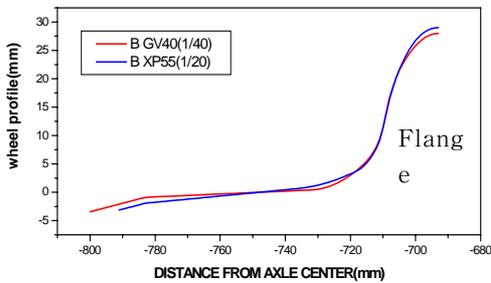


Fig. 3 Wheel profile of GV40 and XP55

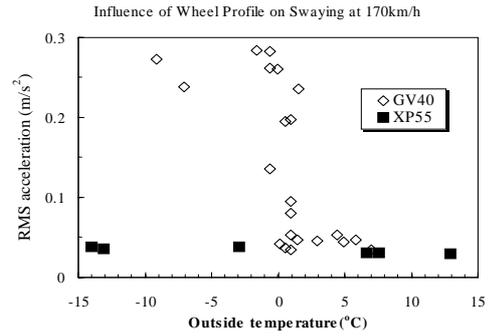


Fig. 4 Influence of wheel profile on lateral acceleration at 170km/h

## 2.2 KTX차량의 횡 진동 특성 해석결과

KTX차량의 후미 횡 진동의 원인분석 및 효과적인 대책방안을 제시하기 위해서 20량(동력차2량+동력객차2량+객차16량)의 KTX차량을 모델링하였으며, 경부고속철도구간(서울기점 106.3km~123.3km)의 검측데이터를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

Fig.5는 KTX차량이 150km/h의 속도로 직선구간 통과 시 공기 스프링의 횡 방향 강성 변화에 따른 각 차호별 횡 방향 진동 가속도에 대한 계산결과이다. 공기 스프링의 횡 방향 강성이 0.1MN/m과 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.

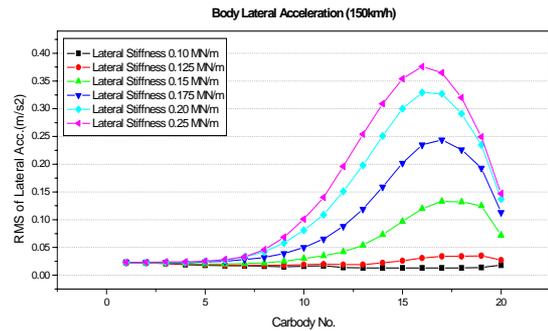
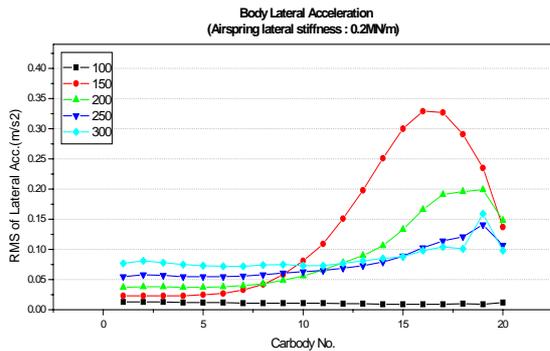


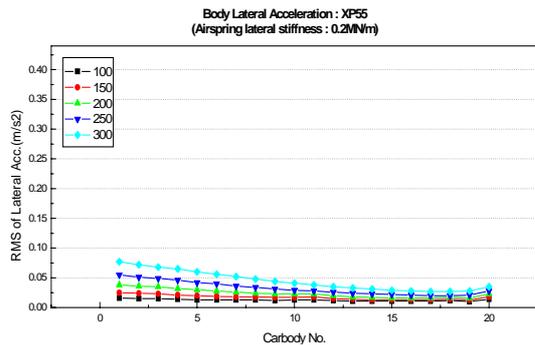
Fig. 5 Calculation results of lateral acceleration at 150km/h(GV40)

Fig.6은 KTX차량의 공기스프링의 횡 방향 강성이 0.2MN/m인 경우 GV40(1/40)차륜과 XP55(1/20)차륜에 대해서 속도변화에 따른 차호별 횡 방향의 가속도에 대한 해석결과를 보여주고 있다. 이 결과로부터 XP55(1/20)차륜의 경우에는 횡 진동이 발생하지 않지만, GV40(1/40)차륜의

경우에는 횡 진동이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 100km/h의 속도에서는 안정한 값을 나타내지만, 차량속도가 150km/h로 증가하면 횡 방향 진동의 크기가 증가하여 불안정해지고 다시 속도가 250km/h이상으로 증가하면 기준치 이하로 안정화되는 것을 알 수 있다. 그러나, 250km/h 이상의 속도영역에서는 19번째 동력객차의 횡 진동이 다른 차량에 비해서 큰 것을 알 수 있다.



(a)GV40(1/40)



(b) XP55(1/20)

Fig. 6 Calculation results of lateral vibration for KTX with GV40 and XP55 profile at 150km/h(0.2MN/m)

Fig. 7은 차량속도와 공기 스프링 횡 강성 변화에 따른 17번째 차량의 차체에 대한 횡 진동 값이다. 횡 강성이 0.15MN/m이상에서는 중·고속 영역(150km/h~200km/h)에서 횡 진동이 큰 것을 알 수 있으며, 전체적으로 공기 스프링의 횡 강성이 증가하면 횡 진동의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8(a)는 경부고속철도 시험선 구간인 서울기점 106.3 km~123.3km(17km구간)에 대한 해석결과로서 곡선구간(7000m)이 포함되어 있다. 횡 강성이 0.15MN/m인 경우 150km/h로 주행 시 GV40(1/40)차륜에 대한 17번째 차체의 횡 가속도로써 직선구간에서만 횡 진동이 발생하고, 곡선구간에서는 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 결과에서 직선구간에 대한 차체의 횡 방향 진동 가속도의 주파수 분석 결과이다. 약 0.55Hz의 진동 성분을 갖고 있는 것을 알 수 있다.

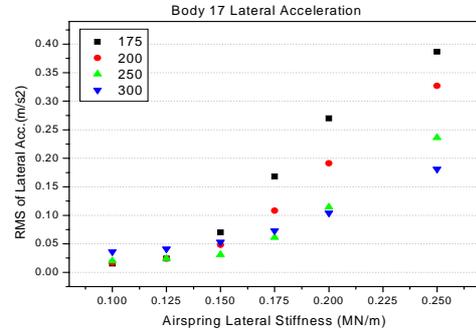
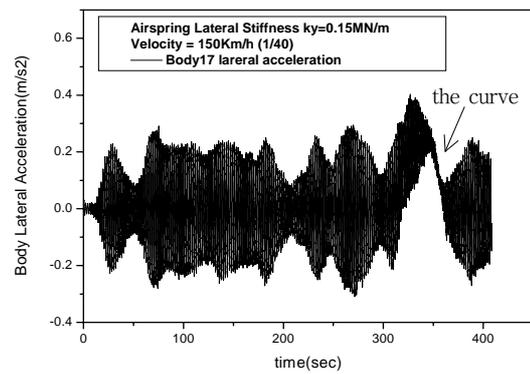
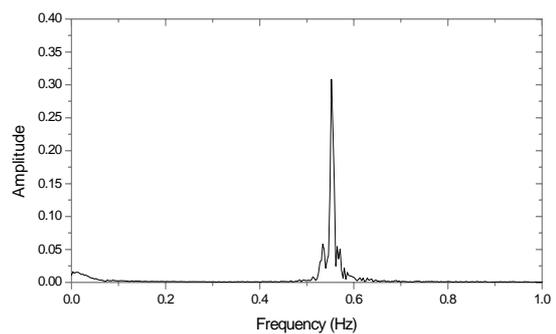


Fig. 7 Calculation results of lateral vibration of 17th carbody on air spring stiffness and train speed



(a) Acceleration Level



(b) Frequency analysis result

Fig. 8 Lateral vibration of 17th carbody (A/S stiffness: 0.15MN/m)

### 3. 시험과 해석결과의 비교 및 검토

#### 3.1 횡 진동 시험 및 해석결과의 비교

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

Fig.9는 공기 스프링의 횡 방향 강성이 0.2MN/m인 경우 19번째 차체의 GV40(1/40)에 대한 진동가속도의 해석결과이다. 그리고 Fig.10은 Fig9의 해석결과와 측정결과에 대한 비교이다. 차량속도 150km/h영역에서 해석결과의 크기가 측정결과보다 약2배정도 크지만 진동의 형태는 유사한 것을 알 수 있으며, 300km/h의 경우에는 측정결과와 해석결과가 거의 유사한 것을 알 수 있다.

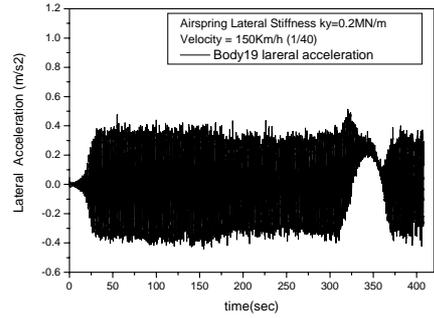
Fig.11은 Fig.10의 해석결과와 측정결과에 대한 주파수 분석 결과를 나타내고 있다. 차량속도 150km/h인 경우 해석결과와 측정결과의 주파수가 동일하게 약0.55Hz의 성분을 갖고 있는 것을 확인 할 수 있으며, 300km/h의 경우에는 약0.55Hz~1Hz의 주파수 성분을 갖고 있으며, 특히 1Hz 성분이 큰 것을 알 수 있다.

Fig.11은 위의 결과를 이용하여 차량속도와 주파수 변화에 따른 횡 진동의 크기를 나타내었다. 이 결과에 따르면 차량의 속도가 증가할수록 횡 진동의 진폭은 감소하면서 최대크기를 갖는 주파수는 0.55Hz에서 약1Hz까지 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

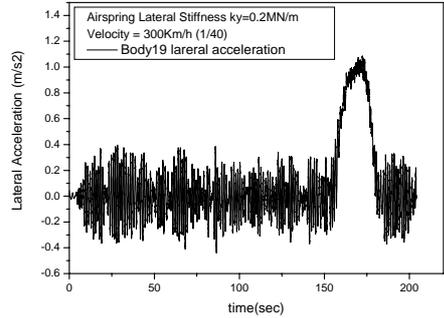
#### 3.2 횡 진동의 원인 분석

철도차량 해석 시 차륜과 레일의 접촉력에 의해서 차량의 진동특성이 속도와 차륜의 답면구배에 따라 변하며, 고유진동수와 모드 형상도 변한다. 또한 이 고유진동수에 대한 모드의 댐핑값이 음으로 나타날 경우 차량의 진동이 급격히 커지는 불안정한 상태가 된다(3).

Fig.13은 KTX차량의 공기스프링의 횡방향 강성이 0.15MN/m인 경우 차륜의 답면구배와 속도변화에 따라서 댐핑 값이 음으로 나타나는 고유진동수를 나타내고 있다. Fig.11의 결과에 나타난 0.55Hz와 1Hz 성분의 주파수가 150km/h와 300km/h에서 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 결과에서 0.55Hz는 차량의 후미부 횡 진동을 발생시키는 주파수 성분이며, 1Hz는 후부 동력궤차의 횡 진동을 발생시키는 주파수 성분으로 생각된다. 또한 차륜의 답면구배가 높아지면 차량의 후미 횡 진동을 발생시키는 0.54Hz성분의 불안정한 모드가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 제2장의 시험결과와 해석결과에서 나타난 것과 같이 차륜의 답면을 XP55(1/20)로 변경하면 후미부 횡 진동은 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

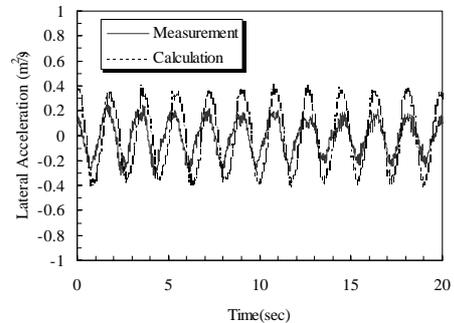


(a) 150km/h

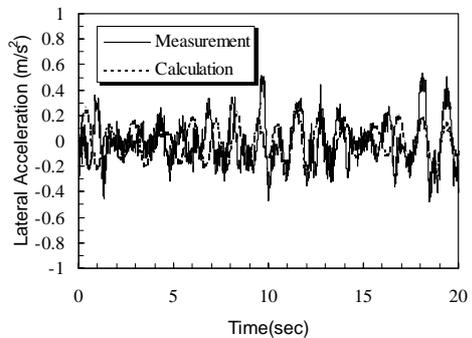


(b) 300km/h

Fig. 9 Calculation results of lateral acceleration of 19th carbody ( A/S stiffness:0.2MN/m)

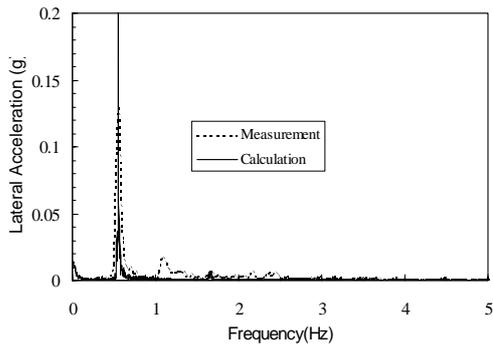


(a) 150km/h

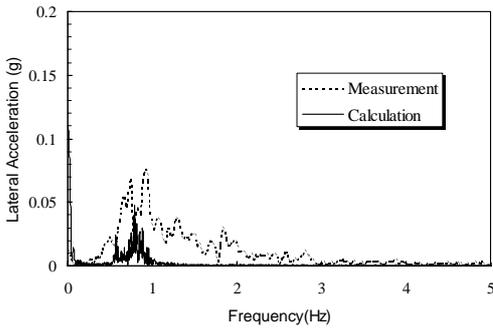


(b) 300km/h

Fig.10 Comparison of calculation results and measurement of 19th carbody

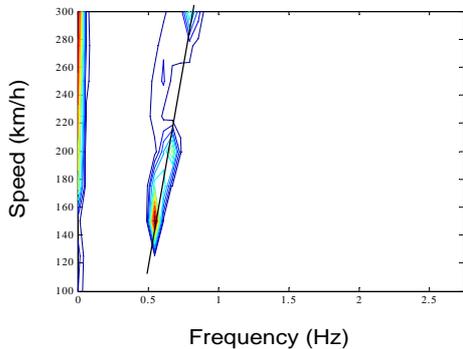


(a) 150km/h

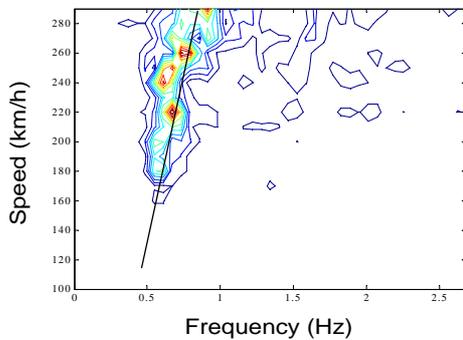


(b) 300km/h

Fig. 11 Frequency analysis of lateral acceleration



(a) Calculation



(b) Measurement

Fig.12 Frequency of lateral acceleration for train speed

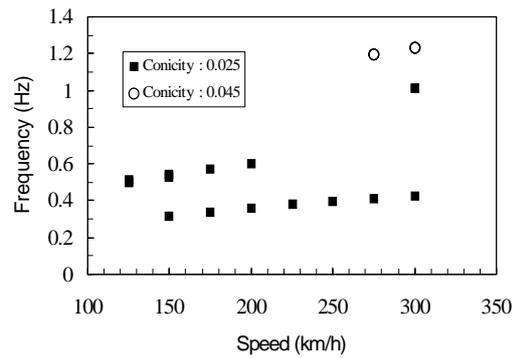


Fig.13 Frequency of unstable modes  
(A/S stiffness: 0.15MN/m)

#### 4. 결론

KTX 후미차량 횡 진동에 대한 원인분석 및 효율적인 대책방안을 제시 하기 위해서 KTX20량 편성을 모델링 하여 수치해석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. KTX 차량의 횡 진동은 동절기 직선구간 주행 시 140km/h~200km/h의 속도영역에서 14번째~17번째 차량에서 가장 크게 나타난다. 이 횡 진동은 2차 현가 장치인 공기스프링의 횡 방향 강성에 크게 영향을 받으며, 횡 방향의 강성이 증가할수록 횡 진동이 증가하는 것을 알았다.
2. 횡 진동에 대한 주파수 분석결과 차량의 속도 150km/h일 경우 약 0.55Hz에서 나타났으며, 해석결과와 시험결과가 일치하였다. 또한, 차량의 속도가 증가할수록 횡 진동의 주파수가 1Hz까지 증가하며 이 주파수 성분은 동력객차의 횡 방향 진동에 영향을 미치는 것으로 판단된다.
3. 횡 진동의 진동형태는 후부 쪽으로 커지다가 16번째 혹은 17번째 차량에서 가장 크게 나타났으며, 다시 감소하는 경향을 보였다.
4. 수치해석 결과 횡 진동을 발생 시키는 주파수영역에서 음의 댐핑 값을 가지며, 답면구배가 커지면 객차부 후미 횡 진동을 발생시키는 음의 댐핑 값을 갖는 주파수가 사라졌고 관절대차에 XP55차륜(1/20)을 적용한 실차 시험에서 후미부 불안정한 진동이 사라지는 것을 확인함으로써 답면구배 증가가 후미 차량 횡 진동에 커다란 영향을 미치는 것을 확인하였다.
5. 따라서, KTX 후미 차량 횡 진동은 차륜의 답면구배에 민감한 결과로부터 궤도틀림보다는 KTX 차량의 음의 댐핑 값을 갖는 저주파의 공진주파수에 의해서 발생하는 것으로 판단된다.
6. KTX 후미 차량 횡 진동에 대해서는 차륜의 답면구배를 1/40에서 1/20으로 바꾸면, 공기 스프링의 횡 강

성에 상관없이 횡 진동 문제를 해결 할 수 있으므로  
가장 효율적인 대책방안으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- (1) 藤本, 宮本, "編成車輛의 後尾車 振動", 일본기계학회논문집C, 53-497, 1987.
- (2) 김재철 등, 2002 " 고속철도 주행특성연구",
- (3) AEA TECHNOLOGY "Introduction to railway vehicle dynamic -Ch3 Equations fo motion, Ch4 Stability".1998.