

## 고속철도차량 현가계요소 변위특성 연구

허현무\*, 권성태, 이찬우, 김형진(한국철도기술연구원)

### A Study on the displacement characteristics of suspension elements for KTX

H. M. Hur, S. T. Kwon., C. W. Lee, H. J. Kim(Korea Railroad Research Institute)

#### ABSTRACT

The opening of high speed railway upgraded our land transportation speed limit, causing lots of changes including living and culture and also paving the way for stepping up the railway technology. However, it is also true that we had a limit to adopt the existing railway system structured for 150km/h to the new structure requiring a higher speed of approximate 300km/h due to technological, based on the time and experience. More importantly, heading toward a step of operating such a high speed railway system, it has been practically and quickly proposed that the railway needs high speed railway engineering, maintenance technology of parts of the vehicles to have a stable maintenance foundation and localization of major parts.

Therefore, this study was intended to research the actual displacement characteristics in runningg on an actual track for the purpose of developing the protective and maintenance technology of springs and dampers, which are core parts among suspension elements of a high speed railway vehicle. For this, it was researched the actual vehicle test and its interpretation centered on primary spring, which is used for the suspension system of a bogie, body-body dampers and body-bogie yaw damper. Also, to analyze the displacement characteristics of suspension system in the actual conditions of high speed railway vehicles, a vehicle's dynamic characteristics was analyzed and interpreted. At the same time, a tester for measuring the actual displacement of such suspension elements was designed and attached to actual vehicles, to measure the displacements that occur in running it on the Seoul-Busan line, one of major lines serviced by KTX. The displacement data gained from the test with actual vehicles was analyzed for its displacement distribution depending on the service sections and frequency, with which the valuable data necessary for any potential breakdown or maintenance in the future could be obtained.

**Key Words :** High speed rolling-stock(고속철도차량), Suspension element(현가계요소), Spring(스프링), Damper(댐퍼), Displacement(변위)

#### 1. 서론

고속철도차량의 개통은 국내 육상교통의 속도 한계를 향상시켜 생활, 문화등 전반적 혁신적 변화를 초래하였고, 한편으로는 국내 철도기술을 진일보시킬 수 있는 계기가 되고 있다. 그러나 고속철도 개통 이전 최고속도 150km/h의 속도 범위에 머물고 있던 국내 철도기술기반을 300km/h급의 속도 범위의 기술기반으로 연계시키기에는 시기적, 경험적으로 기

술 격차가 큰 것도 현실이다. 특히, 고속철도의 안정적 운용단계에 접어든 현 시점에서는 고속철도차량 관련 설계기술뿐만 아니라 안정적 유지보수 기술기반 구축을 위한 고속철도차량 부품 유지보수 기술 확보, 주요 핵심부품의 국산화 개발 문제가 현실적으로 시급히 대두되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 고속철도차량 현가계요소 중 핵심부품인 스프링과 댐퍼에 대한 고장 예방 및 유지보수기술 개발을 위한 목적으로 실선로 주

행시 변위특성에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 고속철도차량 객차대차 현가계의 축상스프링, 차체간 댐퍼, 차체/대차간 요댐퍼를 중심으로 현차 시험 및 해석 연구를 수행하였다. 고속철도차량 주행조건에 따른 현가계요소 변위특성을 해석하기 위하여 차량동특성 해석을 수행하였다. 또한, 현가계 요소 실변위 계측을 위한 시험기기를 설계하여 실차량에 취부하였으며 고속철도차량 영업선로 구간인 경부선 서울-부산구간에서 주행시 발생하는 변위를 계측하였다. 실차시험시 발생한 변위 데이터를 운용구간 및 발생빈도에 따라 변위분포 특성을 분석하였다. 이를 통하여 향후 고장 분석 및 유지보수에 필요한 유용한 데이터를 얻을 수 있었다.

## 2. 고속철도차량 현가계 요소

고속철도차량의 현가계 요소는 Table 1과 같이 차량의 유형에 따라 상이하다. 동력차와 같이 큰 하중이 작용하는 동력차 대차에는 1차, 2차현가계에 코일스프링이 적용되고 있는 반면 승객이 탑승하는 동력객차, 부수차 대차의 2차현가계엔 에어스프링이 적용되고 있다. 본 연구의 대상인 부수차 대차는 관절대차로서 1차현가계에 이중코일스프링, 수직댐퍼, 2차현가계에 에어스프링, 차체간 댐퍼, 요댐퍼가 적용되고 있다. 차체간 댐퍼는 인접한 차체간 상부 및 하부에 길이방향으로 취부되어 길이방향의 차체 진동을 감쇄하는 역할을 하며, 요댐퍼는 부수대차와 차체간 요방향 운동에 대한 감쇄역할을 수행한다.

Table 1 Suspension elements of KTX

| 구분      | 1차현가계                        | 2차현가계                            |
|---------|------------------------------|----------------------------------|
| 동력차 대차  | -이중코일스프링<br>-가이드스프링<br>-수직댐퍼 | -코일스프링<br>-수직댐퍼<br>-수평댐퍼<br>-요댐퍼 |
| 동력객차 대차 | -이중코일스프링<br>-수직댐퍼            | -에어스프링<br>-수직댐퍼<br>-수평댐퍼<br>-요댐퍼 |
| 객차 대차   | -이중코일스프링<br>-수직댐퍼            | -에어스프링<br>-차체간 댐퍼<br>-요댐퍼        |



Fig. 1 Suspension elements of carriage bogie

## 3. 변위 해석

주행중 현가계요소에 발생하는 변위량을 분석하기 위하여 실선로 주행시를 모사한 동특성해석을 수행하였다. 해석프로그램은 영국 AEA Technology 사의 철도차량 동특성해석 S/W VAMPIRE (Vehicle dynAmic Modelling Package In a Railway Environment, ver4.1)를 사용하였다.

차량모델은 KTX차량편성중 관절형 부수대차가 적용된 부수차량 5량분에 대하여 모델링하였으며, 궤도는 기존선 구간중 선형이 취약한 급곡선부 일부 구간을 취하여 모델링하였다. Fig. 2는 해석에 적용한 궤도의 선형으로서 곡선반경 400m, 500m의 곡률로 구성되어 있다. 속도는 곡률반경400m 통과시 주행속도인 90km/h를 적용하였다.

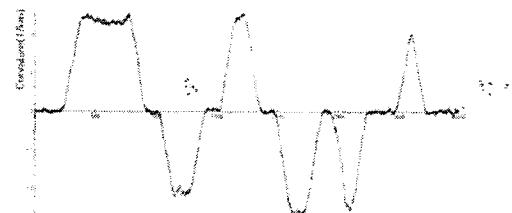


Fig. 2 Curvature of simulation track

Fig. 3과 Fig. 4는 곡선주행시 발생하는 차체간 댐퍼, 차체/대차간 요댐퍼, 축상스프링에 대한 변위해석결과를 나타낸다. 차체/대차간 요댐퍼는 압축 37.7mm, 인장 38.6mm의 변위가 발생하였으며, 차체간 댐퍼는 압축60.6mm, 인장 68.8mm의 변위가 발생하고 있다. 축상/대차간 상하방향으로 취부된 축상스프링의 경우, 스프링 길이방향 운동변위는 압축 22mm, 인장 20mm로 예측된다.

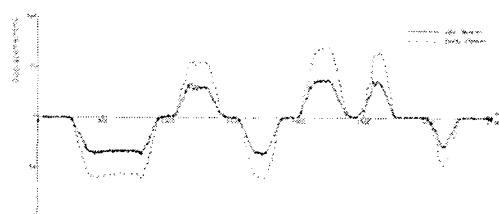


Fig. 3 Analysis of damper displacements

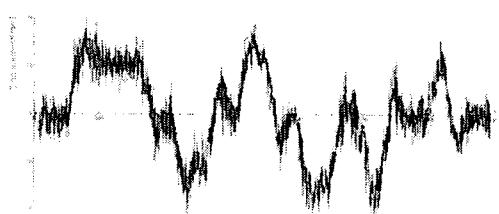


Fig. 4 Analysis of primary spring

## 4. 변위측정 실차시험

### 4.1 시험개요

실선로 주행중 발생하는 실변위를 측정하고자 실차시험을 실시하였다. 시험구간은 영업선로중 KTX 차량이 주행하는 경부선 행신-부산구간에서 실시되었다. 차체간 댐퍼, 요댐퍼, 축상스프링에 발생하는 변위량을 계측하고자 변위측정시스템을 구성하였다. 측정시스템은 변위센서, signal conditioner, acquisition system으로 구성되며, 변위센서는 PATRIOT사의 Cable 변위계(Model MP-20A)를 사용하였다. Fig. 5는 축상스프링 변위를 측정하기 위한 센서와 지그를 나타내며, Fig. 6은 차체간 댐퍼 변위를 측정하기 위하여 댐퍼 양단에 설치된 센서를 나타낸다.

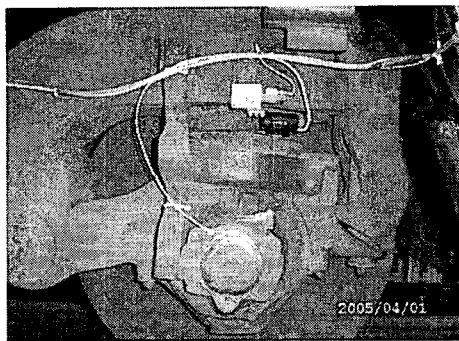


Fig. 5 Displacement sensor to measure primary spring displacement

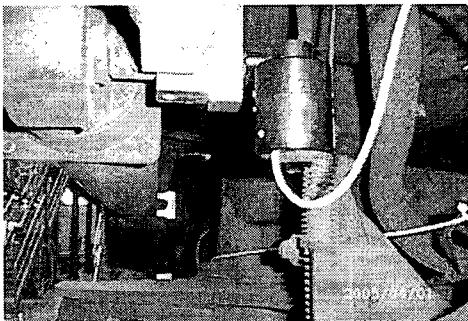


Fig. 6 Displacement sensor to measure damper displacement

### 4.2 시험 결과

실선로 주행시 발생하는 변위의 크기 및 빈도에 대하여 분석하였다. Fig. 7은 기존선 구간중 곡률반경 400m 통과시 발생하는 댐퍼, 축상스프링 실변위를 나타낸다. Table. 2은 곡률반경 400m 통과시 발생하는 변위에 대한 해석 및 실측값을 비교한 표이다. 차체간 댐퍼의 변위량이 가장 크며 축상스프링의 변위는 20mm 내외임을 알 수 있다.

해석에 비하여 실측데이터가 다소 작게 발생하였으나 이는 궤도, 속도등 해석조건의 모사과정에서

발생한 오차에서 비롯된 결과라 할 수 있으며, 차체간 댐퍼, 요댐퍼, 축상스프링간의 변위특성 경향은 해석결과와 잘 부합하고 있음을 알 수 있다. 따라서 향후 유사 차량의 변위량 분석시 실측뿐만 아니라 해석에 의하여서도 충분히 변위특성 예측이 가능하리라고 판단된다.

Table. 2 Displacements on curve(R400)

|        | 실측량(mm) | 해석량(mm) |
|--------|---------|---------|
| 차체간 댐퍼 | 61      | 68.8    |
| 축상스프링  | 33      | 38.6    |
| 요댐퍼    | 17      | 22      |

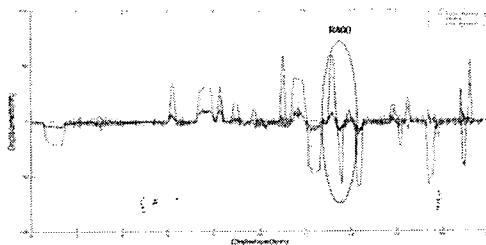


Fig. 7 Displacements on curve(R400)

Fig. 8-Fig. 12는 경부선 부산→행신구간의 상행선로상에서 측정한 각 구간별 변위량을 나타낸 선도이다. Fig. 8과 같이 부산→동대구 구간에서는 변위발생 빈도가 크게 나타나고 있다. 이는 이 구간이 기존선 구간으로 곡선의 빈도가 타구간 보다 많음에 기인한 결과라 할 수 있다. 그러나 변위량의 크기측면에서 보면 Fig.12의 서울→행신구간에 비해선 작게 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 고속철도 개통에 앞서 곡률반경 600m 이상으로 선형을 개량한 선로특성에 비롯된 결과라 사료된다.

Fig. 9는 동대구→대전구간의 변위선도로 운행구간의 초반 및 후반부에 변위 발생빈도가 높음을 알 수 있다. 이는 고속선 진입 전후 기존선 구간 주행에 따른 것이라 할 수 있으며, 직선선로로 구성된 고속선 구간에서는 Fig.10의 대전→광명구간과 마찬가지로 변위량은 매우 작게 발생하고 있다.

Fig. 12는 서울역→행신구간의 변위선도이다. 이 구간에서는 KTX 운행선로중 최대 변위가 발생하고 있음을 알 수 있다. 차체간 댐퍼인 경우 압축 97mm, 인장 107mm, 요댐퍼인 경우 압축 60mm, 인장 66mm의 변위가 발생하고 있으며, 축상스프링은 압축 24mm, 인장 9mm의 변위량을 보이고 있다. 이는 이 구간의 취약한 선형특성에 기인한 결과라 할 수 있으며, 서울-부산간 영업선로 보다 영업운전후 기지로 귀환하는 구간에서의 변위량이 취약함을 알 수 있다. Fig. 13-Fig. 15은 경부선 상행 운전시 각 구간별로 발생하는 최대 변위량을 나타낸다.

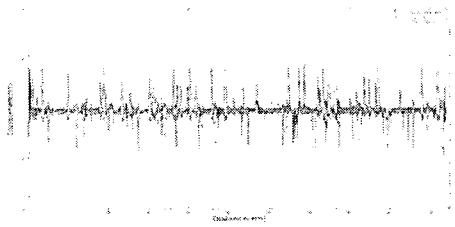


Fig. 8 Displacements between Busan and Dongdawgu

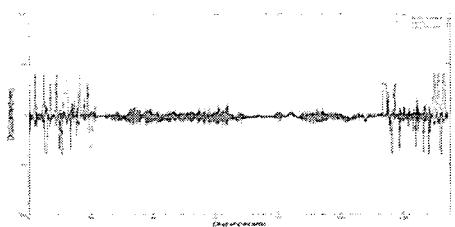


Fig. 9 Displacements between Dongdawgu and Daejeon

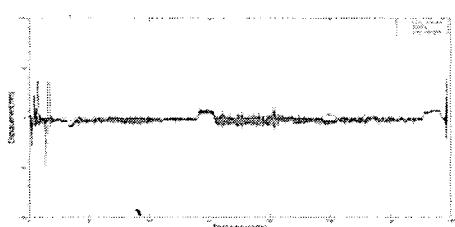


Fig. 10 Displacements between Daejeon and Kwangmyung

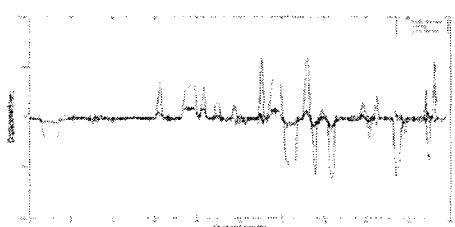


Fig. 11 Displacements between Kwangmyung and Seoul

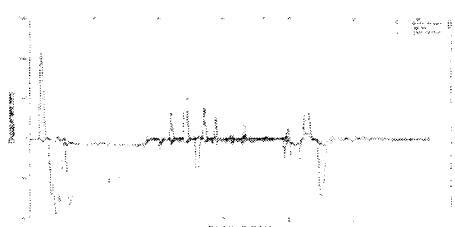


Fig. 12 Displacements between Seoul and Hangsin

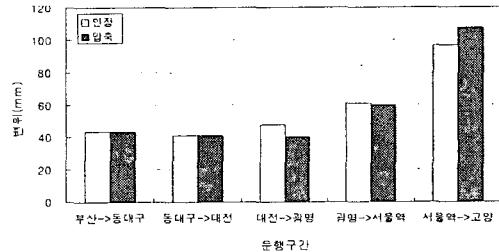


Fig. 13 Maximum displacement of body-body damper

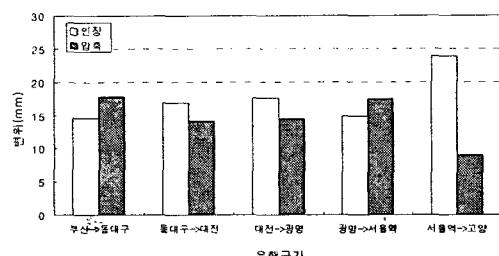


Fig. 14 Maximum displacement of primary spring

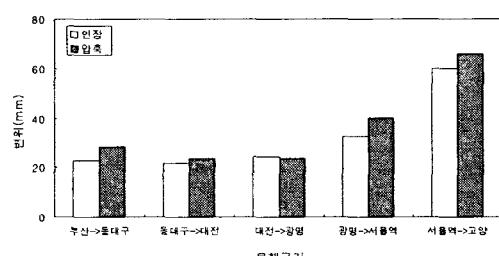


Fig. 15 Maximum displacement of yaw damper

Table. 3은 경부선 상행 부산→행신 전구간에서 발생하는 변위량에 대한 빈도를 분석한 결과이다. Fig. 16, Fig. 17은 각 차체간 댐퍼, 요댐퍼의 20mm이상의 변위빈도분포를 나타낸 선도이다. 앞서 분석한 바와 같이 기존선 구간을 혼용하고 있는 서울-행신, 광명-서울, 부산-동대구구간에서 상대적으로 큰 변위량과 빈도를 보임을 알 수 있다.

이상과 같이 경부선을 대상으로 실측한 결과에서 알 수 있듯이 실제 발생하는 변위는 각 요소의 설계 사양에 비교하면 허용치 이내임을 알 수 있으며, 고장과 관련된 극심한 변위량 발생은 발견할 수 없었다. 그러나 고장과 관련된 인자로는 각 요소의 길이 방향 변위량 뿐만 아니라 곡선주행시 댐퍼 양단간의 비틀림에 의한 너클부 회전변위등도 고려되어야 할 것이며, 측정 선로도 경부선이외 선형이 취약한 호

남선구간에 대한 추가 시험도 향후 필요하리라 판단된다.

Table. 3 Frequency of displacements

| 구분        | 변위<br>(mm) | 부산→<br>동대구 | 동대구→<br>대전 | 대전→<br>광명 | 광명→<br>서울역 | 서울역→<br>행신 | 전구간   |
|-----------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|-------|
| 차체간<br>댐퍼 | -110       |            |            |           |            | 1          | 1     |
|           | -100       |            |            |           |            | 2          | 2     |
|           | -90        |            |            |           |            | 3          | 3     |
|           | -80        |            |            |           | 1          | 2          | 3     |
|           | -70        |            |            |           | 3          | 3          | 6     |
|           | -60        |            |            |           | 4          | 1          | 15    |
|           | -50        | 5          | 4          | 1         |            | 2          | 37    |
|           | -40        | 23         | 12         |           |            | 3          |       |
|           | -30        | 21         | 1          | 3         | 3          | 4          | 32    |
|           | -20        | 12         | 7          | 1         | 1          | 2          | 23    |
|           | -10        | 138        | 118        | 102       | 46         | 6          | 464   |
|           | 10         | 74         | 37         | 35        | 22         | 19         | 187   |
|           | 20         | 7          | 5          | 2         | 3          | 2          | 19    |
|           | 30         | 17         | 1          | 1         | 3          | 1          | 23    |
|           | 40         | 13         | 13         | 4         | 7          | 2          | 39    |
|           | 50         | 15         | 7          | 1         |            | 1          | 24    |
|           | 60         |            |            |           | 3          |            | 3     |
|           | 70         |            |            |           |            | 2          | 2     |
|           | 80         |            |            |           |            |            |       |
|           | 90         |            |            |           |            |            |       |
|           | 100        |            |            |           |            |            |       |
|           | 110        |            |            |           |            | 1          | 1     |
| 축상<br>스프링 | -30        |            |            |           |            | 5          | 5     |
|           | -20        | 1046       | 308        | 26        | 71         | 191        | 1642  |
|           | -10        | 21335      | 19076      | 15560     | 5890       | 7822       | 69683 |
|           | 10         | 4580       | 3484       | 3567      | 1687       | 1129       | 14447 |
|           | 20         | 16         | 5          | 3         | 17         |            | 41    |
| 요댐퍼       | 30         |            |            |           |            |            |       |
|           | -70        |            |            |           |            |            |       |
|           | -60        |            |            |           |            | 2          | 2     |
|           | -50        |            |            |           |            | 2          | 2     |
|           | -40        |            |            |           | 4          | 5          | 9     |
|           | -30        | 3          | 3          | 1         | 5          | 8          | 2     |
|           | -20        | 39         | 15         | 3         | 1          | 5          | 63    |
|           | -10        | 56         | 28         | 13        | 18         | 14         | 129   |
|           | 10         | 142        | 121        | 120       | 47         | 64         | 494   |
|           | 20         | 22         | 7          | 1         | 3          | 4          | 37    |
|           | 30         | 27         | 15         | 5         | 9          | 1          | 57    |
|           | 40         |            |            |           | 2          | 3          | 5     |
|           | 50         |            |            |           | 1          |            | 1     |
|           | 60         |            |            |           |            |            |       |
|           | 70         |            |            |           |            | 1          | 1     |

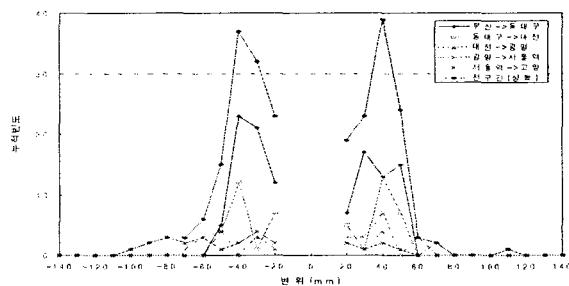


Fig. 16 Displacement distribution of body-body  
damper(Busan→hangsin)

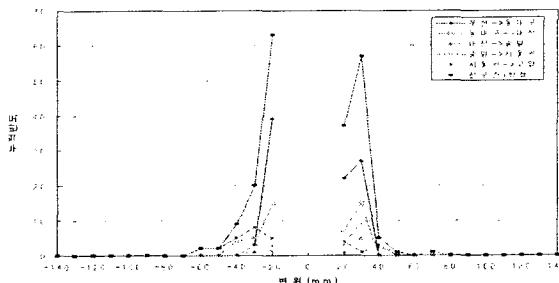


Fig. 17 Displacement distribution of yaw  
damper(Busan→hangsin)

#### 4. 결론

고속철도차량 현가계 요소인 차체간 댐퍼, 요댐퍼, 축상스프링에 대한 변위특성 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

변위해석및 실차시험 결과를 비교하여 볼 때, 해석결과의 타당성을 확인할 수 있었으며, 향후 신차 및 부품 개발시 변위예측 기법으로 활용 가능하다. 변위량 실측결과, 모두 허용치 이내의 수준을 보였으며, 기존선 운용구간의 변위량및 빈도가 상대적으로 크게 발생하였다.

그러나 향후 고장예방 및 진단측면에서 호남선을 포함한 영업선 전구간에서의 실차시험이 진행되어야 할 것이며 댐퍼 너클부의 회전변위에 대한 연구도 추가적으로 수행되어야 할 것이라 사료된다.

#### 참고문헌

- "Technical Specification for Supply of The Carbody to Carbody Dampers," Korea TGV Consortium, 1996
- Vijay K. G., Rao V. D., "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press, 1984
- "VAMPIRE User Manual", AEA Technology Rail, 2003