

# 철도차량 현가요소에 따른 고유치 특성 변화에 대한 고찰

## A Study on the Variation of Eigenvalue by Railway Suspension

\*신유정<sup>1</sup>, 김남포<sup>2</sup>, 유원희<sup>2</sup>

\* Y. J. Shin(yjshin@krri.re.kr)<sup>1</sup>, N. P. Kim<sup>2</sup>, #W. H. You<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 과학기술연합대학원대학교 미래첨단교통시스템공학, <sup>2</sup> 한국철도기술연구원 철도시스템연구센터 주행추진연구실

Key words : Eigenvalue Analysis, Instability, Suspension Device

### 1. 서론

철도차량의 설계변수를 변경해야하는 경우, 어느 부분을 얼마나 변경해야하는가는 매우 어려운 문제이다. 특히 기존의 국내 철도차량 개발은 최고속도에서의 주행안정성을 확보하기 위한 설계가 이루어졌기 때문에 안정성면에서는 우수한 편이나 곡선 주행성능에서는 취약한 상태이다. 이러한 점을 보완하기 위한 방법으로 주행안정성과 급곡선 선회 성능을 모두 만족시키기 위해 고려해야 할 파라미터 중의 하나로 현가장치의 강성값 특성에 대해 파악할 필요가 있다. 본 논문에서는 현재 설계되고 있는 현가요소의 강성에 대해 고유치 해석방법(eigenvalue analysis method)을 이용하여 차량시스템의 불안정도를 해석을 통해 특성을 파악하고자 한다.

### 2. 차량 모델링

철도차량의 수학적 모델은 철도차량의 중요한 동적 특성을 물리적인 면과 기계적인 면을 모델구성의 정확도에 따라 거동예측의 정확도에 영향을 미치게 된다. 이와 같은 모델링 방법은 해석하고자 하는 모델의 주행상태에 따fms 정상 및 과도응답을 해석목적에 따라 적절히 선정되어야 한다. 본 논문에서는 차체, 대차, 윤축으로 구성된 기존의 일반적인 차량에 대해 14자유도로 모델링 하였으며, Fig. 1에서와 같이 구성된다.

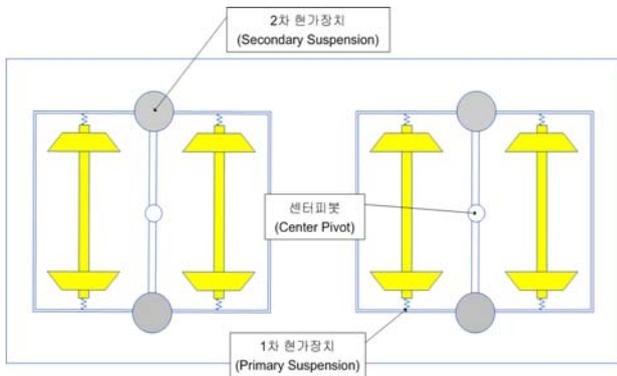


Fig. 1 Full Vehicle model

철도차량에 대한 횡방향과 요(yaw)방향의 기본 운동방정식은 다음과 같으며, 아래첨자는 각각 t는 대차, c는 차체, w는 윤축을 나타낸다.

$$m_t \ddot{y}_t = F_{syt} + (m_t + m_c) \left( \frac{V^2}{gR} - \phi_{se} \right) g$$

$$I_t \ddot{\psi}_t = M_{szt}$$

$$m_c \ddot{y}_c = F_{syc} + m_c g \left( \phi_{se} - \frac{V^2}{gR} \right)$$

$$I_{cz} \ddot{\psi}_c = M_{szc}$$

$$m_w \left( \ddot{y}_i - \frac{V^2}{R} + g\phi_{sc} \right) = F_{Ly_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i) + F_{Ry_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i) + N_{Ly_i} + N_{Ry_i} + F_{sy_i} - F_{t_i}$$

$$I_{wz} \ddot{\psi}_i = [R_{Rx_i} F_{Ry_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i) - R_{Ry_i} F_{Rx_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i)] + [R_{Lx_i} F_{Ly_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i) - R_{Ly_i} F_{Lx_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i)] + (R_{Rx_i} N_{Ry_i} + R_{Lx_i} N_{Ly_i}) + M_{Lz_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i) + M_{Rz_i}^n(y_i, \dot{y}_i, \psi_i, \dot{\psi}_i) + M_{sz_i}$$

철도차량의 중요한 특징은 차체에서 윤축까지 vertical suspension이 추가로 연결되어 있으며, 횡방향(lateral)과 종방향(longitudinal) 스프링과 댐퍼가 있다. 어떤 진행속도에서 윤축의 운동특성은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 kinematic oscillation의

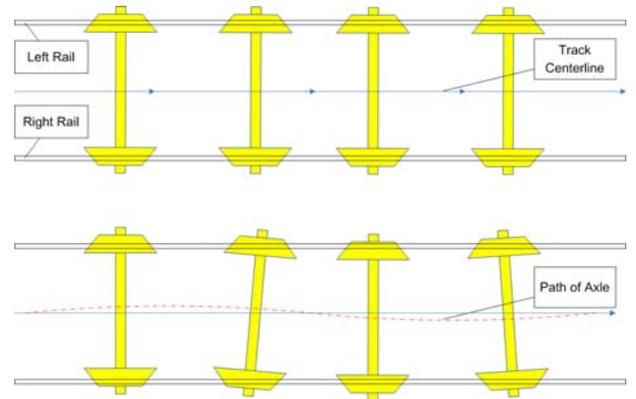


Fig. 2 Kinematic motion of a free wheelset

주파수에서 진동한다.

이 주파수는 속도에 비례하기 때문에 저속에서는 관성력(inertia force)은 작을 것이고, 결과적으로 윤축에 작용하는 힘은 차체에서 윤축으로 연결된 스프링에 의한 복원력이다. 이 힘의 균형을 잡기 위해 크립을 충분히 고려해야한다. 고속에서는 inertia force 의해 안정성이 좌우되고, 주파수가 고주파수에 해당한다. 이 경우 크립은 횡방향으로 진동하는 동안 횡방향 변위가 점층적으로 증가하도록 야기시킨다. 윤축의 횡(Lateral)방향과 요(Yaw)방향 운동방정식에서 기하학적인 운동방정식의 특성근을 구하면 아래와 같이 나타난다.

$$y = Y e^{\lambda t}, \lambda_{1,2} = \pm i V \sqrt{\frac{\alpha}{r \cdot b}}$$

$$f_c = \frac{V_s}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha}{r \cdot a}} : \text{Natural frequency mode(Hz)}$$

$\alpha$ : Effective conicity,  $r$ : Wheel rolling radius in central position  
 $2b$ : Half distance between wheel-rail contact points

### 3. 고유치의 변화 특성

실수부분은 감쇠정도를 나타내며 허수부분은 감쇠고유치를 의미하는 것으로 감쇠가 없을 경우에는 실수부분은 0이 되며 허수부분이 고유치를 나타낸다.

비감쇠 다자유도계에서는 모든  $\lambda_i$ (고유치)들의 실수부  $\sigma_i$ 는 영(zero)이며, 그 허수부는 고유진동수  $\omega_i$ 가 됨을 알 수 있다. 일반적으로 계의 감쇠가 있을 경우  $-\sigma_i$ 는  $i$ 번째 모드의 감쇠정

도를 나타내며  $\omega_i$ 는  $i$ 번째 모드의 주파수(감쇠고유진동수)를 나타낸다. 즉,  $\sigma_i = 0$ 이면  $i$ 번째 모드는 비감쇠가 되고  $\sigma_i < 0$ 이고  $\omega_i \neq 0$ 이면 이 모드는 부족감쇠,  $\sigma_i < 0$ 이고  $\omega_i = 0$ 이면 이 모드는 과다 감쇠,  $\sigma_i > 0$ 이면 계는 불안정하여  $i$ 번째 모드는 시간이 지남에 따라 지수적으로 증가하게 된다.

고속에서는 불충분한 크립력에 의해 Wheelbase 틀어짐과 같은 static 불안정을 가지게된다. 그래서 차륜의 답면(conicity)에 의해 제공되는 안내(guidance)는 잠재적인 불안정성의 근원이다.

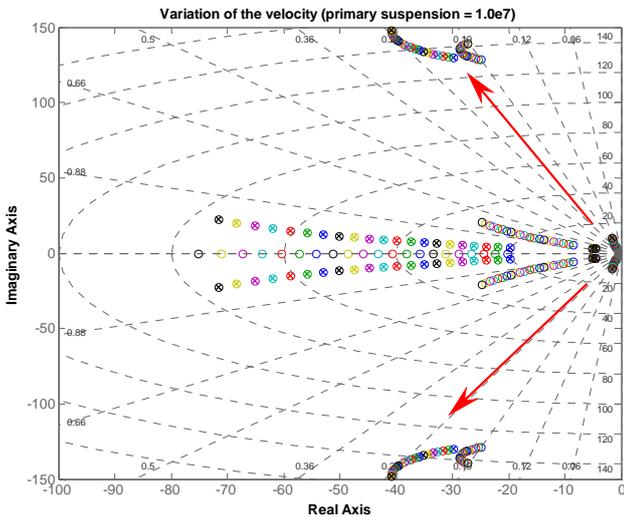


Fig. 3 Variation of eigenvalue by the velocity(Kpy=1.0e7)

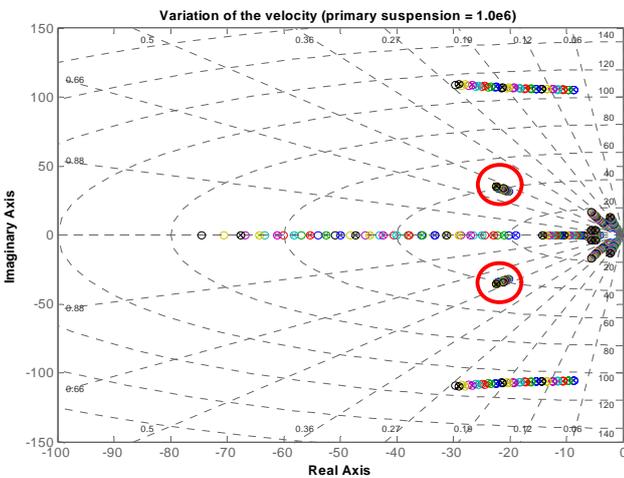


Fig. 4 Variation of eigenvalue by the velocity (Kpy=1.0e6)

횡방향 일차 현가의 강성을 고정시키고 속도를 50km/h ~ 150km/h를 변화시켜가면서 고유치를 추적해본 결과 Fig.3 ~ Fig.4에서와 같이 나타났다. 고유치의 변화를 비교해본 결과 낮은 강성에서는 속도가 변함에 따라 대부분의 고유치가 음의 실수축 방향으로 이동하였고, 높은 강성에서는 어느 정도 음의 실수축 방향으로 이동하다가 방향이 반대쪽으로 전향됨을 볼 수 있다. 이는 낮은 강성보다 높은 강성에서 속도변화의 영향을 많이 받음을 확인할 수 있었다.

Fig.5 ~ Fig.6은 각각 저속(50km/h)과 고속(150km/h)에서 강성을 변화시켜가면서 고유치 변화를 알아보았다. 그 결과 강성 1.0e<sup>6</sup>N/m ~ 1.0e<sup>7</sup>N/m를 변화시켜가면서 고유치를 추적해본 결과 저속에서는 강성의 크기가 많이 변함에도 불구하고 고유치의 이동경로가 크게 변하지 않고, 150km/h의 속도에서 강성의 변화에 따른 고유치 이동 경로로 볼 때 저속일 때 보다 영향을 많이 받는 것을 확인할 수 있었다.

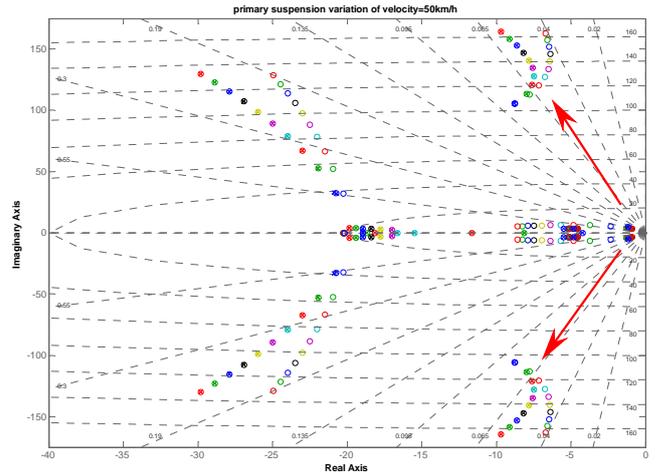


Fig. 5 Variation of eigenvalue by the primary suspension(V=50km/h)

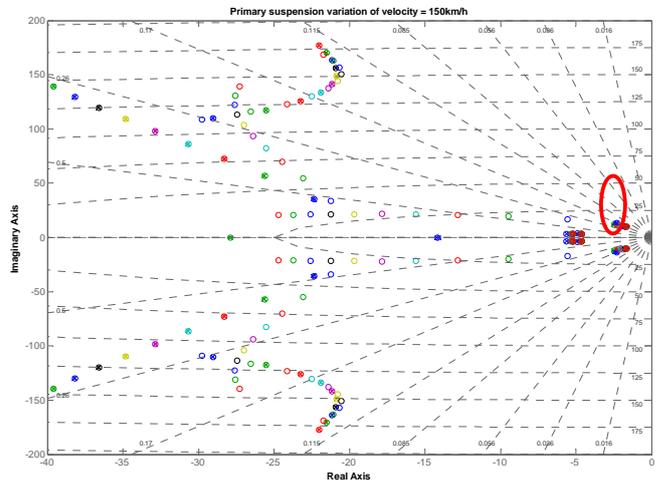


Fig. 6 Variation of eigenvalue by the primary suspension(V=150km/h)

#### 4. 결론

일차강성의 변화에 따른 고유치의 이동경로와 속도변화에 따른 고유치의 이동경로를 추적함으로써 일차강성과 속도사이의 상관관계에 대해 알아보았다. 이것은 철도차량 종류에 따라 적절한 강성이 설계되어야 하는데, 과잉강성에 의한 곡선 주행 성능이나 승차감에 미치는 영향 인자를 고려할 때 활용할 수 있을 것으로 기대하며 앞으로 일차 강성뿐만 아니라 여러 다른 설계 파라미터에 대해서도 해석하여 철도차량 특성을 파악할 예정이다.

#### 참고문헌

1. Rao V. Dukkipati, " Vehicle Dynamics ", CRC Press LLC, 2000
2. A. H. Wickens, " Fundamentals of Rail Vehicle Dynamics ", Swets & Zeitlinger, 2003
3. 박준혁, 허현무, 유원희, "현가특성 변화에 따른 도시형 전동차의 임계속도 선형해석" 한국철도학회 논문집, 2007
4. 유원희 외, "도시형 친환경 열차 대차시스템 개발" 한국철도기술연구원 연구보고서, 2008