

철도차량의 진동과 변위로부터 유추할 수 있는 탈선가능성에 관한 연구

A Study on Derailment Possibility that can Analogize from Vibration and Displacement of Rolling Stocks

홍용기* 함영삼**
Hong, Yong Ki Ham, Young Sam

ABSTRACT

The important factor to evaluate the running safety of a railway vehicle would be the interaction force between wheel and rail(derailment coefficient), for which is one of important factors to check the running safety of a railway vehicle that may cause a tragic accident. Especially, a newly developed vehicle that first runs commercially requires necessarily the measurement and evaluation of derailment coefficient for securing the safety of a vehicle while measuring the derailment coefficient in view of securing running safety could be the more important factor than any other factors. In this paper, examined possibility that can forecast derailment possibility to behavior of only vibration and displacement by measuring vibration acceleration and displacement in vehicles that travel actuality rail track, and compares with data of wheel load/lateral force result.

1. 서론

철도차량의 주행안전성을 평가하는 중요한 항목은 차륜과 레일 사이에서 작용하는 수평방향하중과 수직방향하중의 비율인 탈선계수라고 할 수 있는데, 이는 탈선이 철도차량의 주행안전성을 저해하는 중요한 요인으로서 대형사고로 직결되기 때문이다. 특히 새롭게 개발하여 영업운행에 투입되는 차량에 있어서 주행안전성의 측정과 평가는 안전을 위한 필수적인 과정이며 주행안전성의 확보 측면에서 탈선계수의 측정은 다른 어떤 항목보다 중요하다고 할 수 있다.

탈선에 관한 문제는 횡압을 제거함으로써 모든 문제를 해결한다 해도 과언이 아니다. 그만큼 윤중 감소보다 횡압의 증가가 위험하다는 것을 의미하기도 하지만, 차륜의 마모저감이나 레일의 유지보수주기 연장 등 매우 많은 문제에 횡압이 관여한다는 것을 의미한다. 탈선사고는 자주 발생하지는 않지만 한번 발생하면 치명적인 대형사고로 연결된다. 그러한 사고는 차량뿐만이 아니라 궤도, 전기신호 등 여러 시스템이 복합적으로 원인을 제공하는 것이므로 차량 측면에서는 횡압의 저감이 가장 큰 당면과제라고 할 수 있다⁽¹⁾.

본 논문에서는 철도차량의 횡방향 거동을 집중적으로 분석하였으며 이를 위해 실제 선로를 주행하는 차량에서 진동가속도와 변위를 측정하였고, 더불어 윤중/횡압 데이터와 비교함으로써 진동과 변위의 거동만으로 탈선 가능성을 예측할 수 있는 지 검토하였다.

* 한국철도기술연구원, 도시교통기술개발센터, 정회원

E-mail : ykhong@krri.re.kr

TEL : (031)460-5501, FAX : (031)460-5749

** 한국철도기술연구원

2. 이론적 배경

탈선 또는 주행안전도를 평가하는 대표적인 기준은 탈선계수로서 이를 정확히 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으며, 현재까지 국내에서 사용하고 있는 가장 보편적인 방법은 스트레인게이지를 차륜에 부착하여 차륜이 받는 수직하중과 수평하중을 측정함으로써 탈선계수를 계산하는 것이다. 스트레인게이지를 이용한 탈선계수 측정시 회전하는 차륜으로부터 데이터를 확보해야 하므로 측정용 특수 차축과 회전부위의 신호전달을 위한 장비가 필수적이다. 이 경우 스트레인게이지 부착, 브리지 회로 구성, 신호 튜닝 등에 많은 시간과 경비가 소요되고, 회전부위에서 장비나 게이지가 파손되는 경우가 있으며, 노이즈로 인한 데이터의 부정확성 등 크고 작은 난점이 있다. 이에 따라 회전부위에 직접 센서를 장착하지 않는 방법, 즉, 축 스프링에 변위계를 장착하여 스프링의 변위값으로 하중을 추정하는 법, 진동 가속도계를 차체에 장착하여 차체의 진동특성으로부터 탈선계수를 추정하는 법, 변위계와 가속도계를 동시에 사용하는 법, 또는 레이저 센서 등을 이용하는 법 등이 다양하게 연구되고 있다.

일본과 국내의 일부에서는 차체의 수평 및 수직 진동가속도 특성으로 차량의 주행안전도를 평가하는 방법을 검토한 바 있으며, 이것은 진동가속도의 특성치 즉, 진폭과 주기 등이 주행안전도에 미치는 영향을 고찰한 것이다. 그림 1과 같은 차량모델에서 차체 바닥 중앙을 진동가속도계의 측정점으로 하고 상하진동 및 좌우진동 파라미터인 진폭과 주기가 차륜에 작용하는 횡압과 좌우측 수직압을 수식적으로 표현한 식으로부터 탈선계수와 주행안전도를 관계를 구하면 다음과 같다고 전제하였다^(2, 3, 4).

$$[S] > 0 \text{ 일 때, 탈선계수} = [S] / [R_r]$$

$$[S] < 0 \text{ 일 때, 탈선계수} = [S] \text{ abs} / [R_l]$$

$$[R_l] < [R_r] \text{ 일 때, 주행 안전도} = [R_l] / [S] \text{ abs}$$

$$[R_l] > [R_r] \text{ 일 때, 주행 안전도} = [R_r] / [S] \text{ abs}$$

여기서, R_l, R_r = 좌우 차륜이 궤도로부터 받는 반력 (수직 하중)

S = 차륜이 궤도에 미치는 횡압 (우측을 양으로 함)

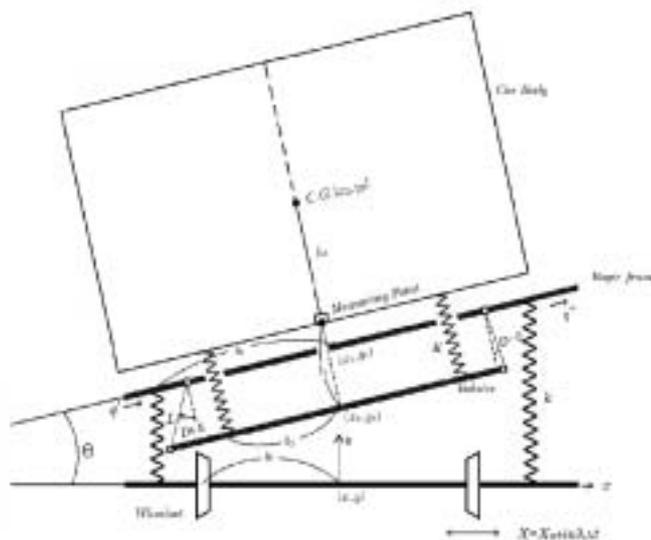


그림 1. Model of rolling stock

3. 본선주행시험

3.1 시험준비

3.1.1 개요

시험구간은 인천공항철도의 1차 개통구간인 인천공항역에서 김포공항역까지 하였으며, 시험대상차량은 인천공항철도 직통형 차량으로 하중조건은 만차조건으로 하였다. 측정용 윤축에서 발생하는 하중 신호를 차량 내에서 실시간으로 확인하고 저장하기 위하여는 회전체인 윤축에서 고정체인 차체로 신호를 전달해 주어야 하는데, 이 수단으로는 PCM Telemeter를 이용하였다. 이를 위해 구동핀과 Front Cover를 개조한 Adapter를 제작하여 측정용 윤축의 조립 시 구동핀과 Adapter를 함께 조립하였다⁽⁵⁾.

3.1.2 진동과 변위 측정용 센서

진동가속도는 그림 2와 같은 K-Beam 타입 센서를 사용하였으며, 차체, 대차 프레임, 축상 등 3개 지점에서 상하방향과 좌우방향으로 나누어 6채널을 측정하였다. 변위 측정에는 100 ± 40 mm 용량을 가진 확산반사형 비접촉 광학센서를 사용하여 차체/대차간 및 대차/윤축간 상대변위를 상하방향과 좌우방향으로 구분하여 측정하였다(그림 3).



그림 2. 축상과 대차의 진동가속도 센서



그림 3. 차체와 대차의 상대변위 측정센서



그림 4. 텔레미터 수신기와 하중신호 모니터링

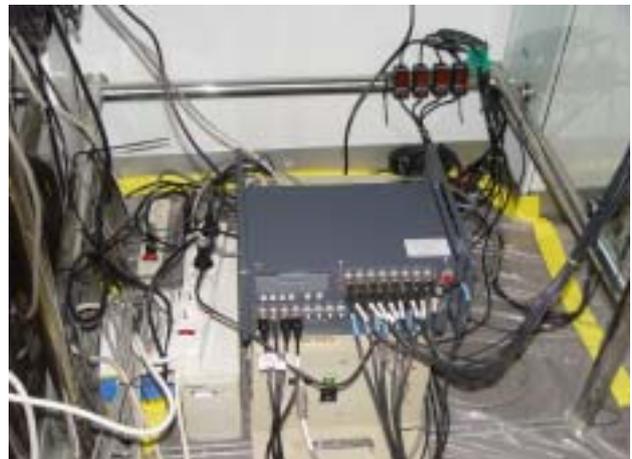


그림 5. 변위현시장치와 데이터 레코더

3.1.3 계측시스템 구축

운측에서 발생하는 운중과 횡압의 하중신호는 운측의 좌우 측상 끝단에 신호 발신기가 내장된 Telemeter를 이용하여 Power Supply, Distributor, Telemetry Receiver, Notebook Computer 등을 이용하여 계측하도록 구성하였으며(그림 4), 진동가속도는 앰프에서 Signal Conditioning 후 데이터 레코더에 저장되도록 하였고, 변위는 앰프에서 측정값을 디스플레이하면서 레코더에 저장하도록 구성하였다(그림 5).

3.2 시험결과

그림 6과 그림 7은 상하방향과 좌우방향의 모든 신호성분을 구분하여 비교한 것으로서, 레코더 뷰어 프로그램을 이용한 로우 데이터이기 때문에 환산값을 반영하지 않고 신호 종류간의 경향만을 파악한 그림이다. 상하방향의 신호들은 하중과 진동과 변위간의 뚜렷한 연관성을 찾기 어려웠으나, 좌우방향의 신호들은 곡선부 주행시에 하중과 변위가 일정한 연관성을 가지는 것으로 나타났다.

그림 8은 인천공항역에서 김포공항역까지 횡방향 거동에 관계된 모든 신호를 속도신호와 같이 시간 축으로 표시한 그래프이며, 그림 9는 56.514 km 지점에서 55.135 km 지점까지 반경 1,000 m를 가진 곡선구간에서의 횡방향 거동을 확대해서 표시한 그래프이다. 곡선의 길이는 1,379 m이며 곡선을 통과하는데 소요된 시간은 63.3 초로서 이 구간에서 열차의 평균속도는 78.4 km/h인 것으로 기록되었다.

차량의 횡방향 진동가속도가 횡압에 미치는 영향을 좀 더 정밀하게 검토하기 위하여 측상 - 대차 프레임 - 차체로 이어지는 3개소의 횡방향 진동가속도를 그림 10에 나타내었다. 이 그래프는 Y축의 범위를 ± 20 g로 설정하여 측상진동 진폭을 수용하였지만, 차체의 진동을 식별하기에는 곤란하였기에 측정위치별로 진동가속도의 진폭을 분석해 본 결과 차체의 횡방향 진동가속도는 횡방향 하중 및 횡방향 변위와 경향이 일치하는 거동을 발견할 수 있었다. 그림 11은 차체의 진동가속도를 FFT Filter Smoothing한 그래프로서 1 Hz보다 높은 주파수의 푸리에 성분을 제거하기 위하여 $1/n\Delta t$ 로 스무딩할 때 $\Delta t=1/1500$ 초이었기에 데이터 포인트의 개수 $n=1500$ 으로 구하였다.

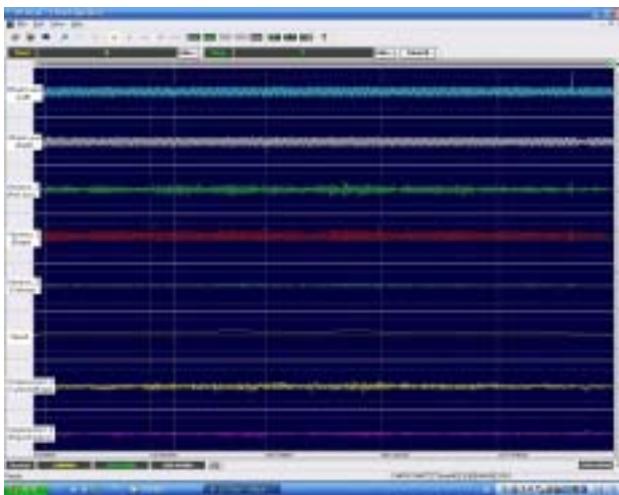


그림 6. 상하방향의 신호성분

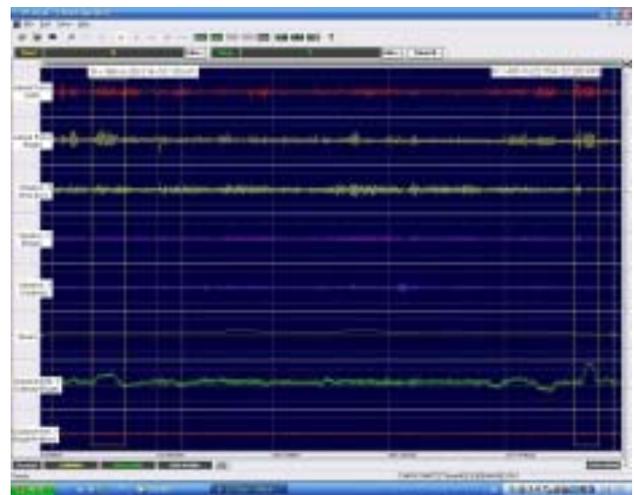


그림 7. 좌우방향의 신호성분

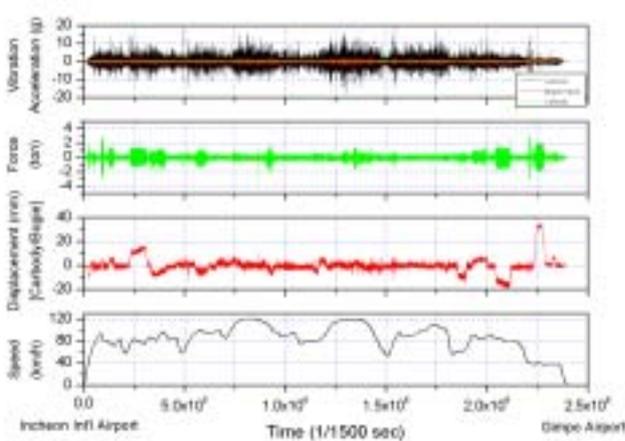


그림 8. 횡방향 거동(인천공항-김포공항)

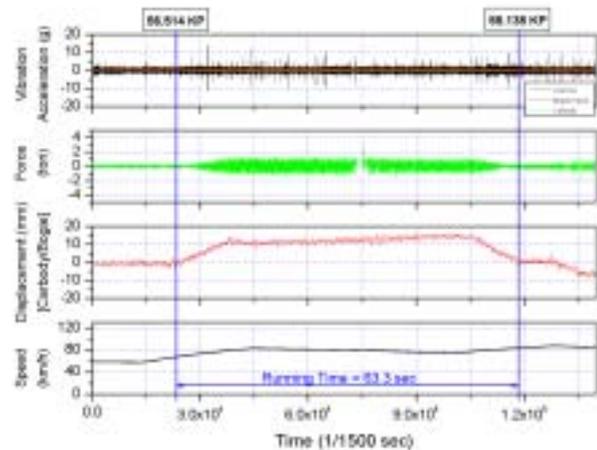


그림 9. 횡방향 거동(곡선반경 100m 지점)

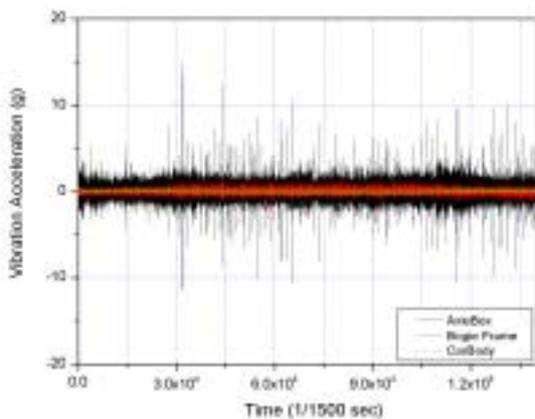


그림 10. 횡방향 진동가속도

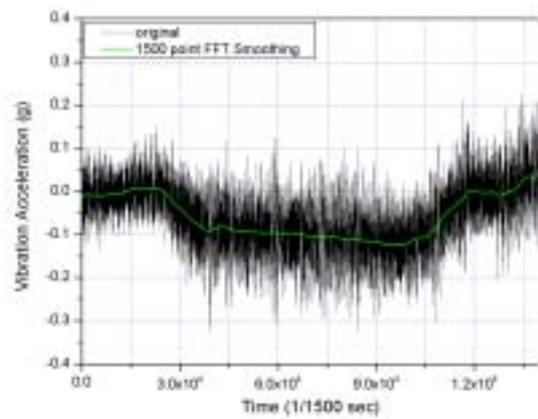


그림 11. 차체의 횡방향 진동가속도

3.3 시험결과 고찰

차량의 진동가속도와 변위가 윤중과 횡압에 미치는 영향을 검토한 결과, 차체와 대차 프레임 사이에서 발생하는 상대변위가 횡압에 가장 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 진동가속도 성분 중에서는 축상위치와 대차 프레임 위치에서는 하중과의 상관관계를 구하려면 추가적이고도 특별한 방법이 검토되어야 하겠지만, 차체의 횡방향 진동가속도는 하중 및 차체/대차 상대변위와 일치하는 거동을 발견할 수 있었다.

그동안 국내의 문헌과 이론으로만 알려져 오던 진동특성과 윤중/횡압 관계는 지금까지의 분석결과로 볼 때 직접적인 연관관계보다는 차량의 현가장치와 질량 특성에 따라 차종마다 달라지는 함수일 것으로 예측된다. 우리나라에도 수십가지 종류의 차량들이 운행되고 있는 실정에서 진동특성과 탈선계수의 관계식을 정립하자면 차종별, 곡선종류별, 운행속도별로 수많은 검토가 이루어져야 할 것이다. 현재 시점에서 유용한 방법은 차체와 대차 프레임 사이에서 발생하는 상대변위와 차체의 정상 횡가속도 성분을 곡선 종류별 및 주행속도별로 분석하여 횡압과의 관계식을 정립하는 것이 실용적일 것으로 판단된다. 아울러 차량의 진동특성은 기 개발된 차량 중 최소 승인을 받아야 할 경우 또는 탈선에 영향을 미치지 않는 정도의 설계변경이 이루어진 차량의 안정성 평가에 적용할 수 있을 것이다. 새로 개발한 철도차량이나 새로 설계한 주행장치를 포함하는 철도차량은 물론이고 기 개발하여 승인된 차량의

운행조건이 변경되었거나 탈선에 영향을 줄 수 있을 만큼 차량의 일부 설계가 변경이 된 경우에는 정상적인 방법으로 차륜과 레일 사이의 접촉력을 측정하여 주행안전성(탈선계수)을 평가하여야 하며, 이때 측정위치는 열차의 진행방향 최전부 차량과 대차에서 하는 것을 원칙으로 하여야 한다.

4. 결론

인천국제공항철도 직통형 차량에서 진동과 변위의 거동이 탈선(윤중/횡압 신호)에 미치는 영향을 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 차체와 대차 프레임 사이에서 발생하는 변위가 횡압에 가장 민감하게 반응하였다.
- 2) 차체의 정상 횡가속도는 횡방향 하중과 변위와 일치하는 거동을 발견하였다.
- 3) 차체의 횡방향 가속도 이외의 진동특성은 윤중/횡압 신호와 직접적인 연관성을 갖지 못하였으므로 차량의 주행안전성을 대변하지 못하며, 안전성이 확보된 차량의 안정성 평가에 한정적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 함영삼, 철도차량의 탈선메커니즘 연구동향, 철도웹진 58호, 한국철도기술 Vol. 06, pp. 23~29, 2006. 03+04
2. 오키시마 키하치, 열차 탈선 방지의 이론과 실제, 1960, 교우사
3. 오키시마 키하치, 철도차량 특론, 1965, 교우사
4. 이관섭 외, 철도차량의 진동특성에 의한 탈선영향 해석, 한국정밀공학회 2005년도 춘계학술대회논문집, pp. 355~360, 2005. 6. 23
5. 함영삼 외, 인천국제공항철도 통근형 차량의 주행안전성 평가, 한국철도학회 2006년도 추계학술대회논문집, 2006. 11. 9