

철도차량의 새로운 탈선계수 측정방법에 관한 연구

A Study on New Measurement of Derailment Coefficient for Rolling Stocks

홍용기*
Hong, Yong-Ki

유원희**
You, Won-Hee

이희성***
Lee, Hi-Sung

ABSTRACT

The running safety of rolling stock is assessed by derailment coefficient. It requires lots of preparatory time, expenditure and high measurement technique to measure derailment coefficient. If derailment coefficient could be measured when track or vehicle is maintained, safety will be improved. The measurement and assessment of running safety is necessary for safety especially for the vehicles newly developed and started service. Therefore measurement of derailment coefficient is most important thing to secure running safety. In this paper, we examined new assessment method which could estimate derailment coefficient by measuring vibration acceleration and displacement of vehicle operating at actual track irrespective of time and place. The new method could be used effectively as a mean confirming running safety.

1. 서 론

열차가 안전하게 주행할 수 있도록 하기 위해서는 철도차량과 선로를 정비하여 승차감과 함께 주행안전성이 확보되어야 한다. 열차의 선로이탈은 철도차량의 주행안전성을 저해하는 중요한 요인으로 대형사고로 이어져 큰 인명과 재난을 가져온다. 그러므로 운행하는 차량은 수시로 안전성을 평가하여 선로나 차량에서의 불안진 요소를 제거하여야 한다.

철도차량의 주행안전성평가는 차륜과 레일 사이에서 작용하는 수평방향하중과 수직방향하중의 비율인 탈선계수로 판정한다. 특히 신조 차량에 있어서 주행안전성의 측정과 평가는 안전을 위한 필수적인 과정이며, 주행안전성의 확보 측면에서 탈선계수의 측정은 다른 어떤 항목보다 중요하다고 할 수 있다. 탈선사고는 자주 발생하지는 않지만 한번 발생하면 치명적인 대형사고로 연결되고, 이러한 사고는 차량뿐만 아니라 궤도, 전기신호 등 여러 시스템에 의해 복합적으로 일어난다^(1, 2).

본 논문에서는 안전성 평가수단인 탈선계수를 다른 방법으로 얻고자 철도차량의 윤중과 횡압에 관련된 변위 및 진동 등을 측정하여 관련성을 집중적으로 비교분석하였다. 실제 선로를 주행하는 차량에서 측정한 윤중과 횡압을 관련된 진동가속도와 변위들의 데이터와 비교함으로써 진동과 변위의 거동만으로 탈선 가능성을 예측할 수 있는 지 검토하였다.

* 한국철도기술연구원, 도시교통기술개발센터, 정희원
서울산업대 철도전문대학원 차량시스템공학과
E-mail : ykhong@krri.re.kr
TEL : (031)460-5501 FAX : (031)460-5749

** 한국철도기술연구원

*** 서울산업대학교 철도전문대학원 교수

2. 이론적 배경

열차가 선로를 주행할 때의 탈선 또는 주행안전도를 평가하는 대표적인 평가기준은 탈선계수로서 이를 정확히 측정하는 방법에는 여러 가지가 있다. 현재까지 국내에서 사용하고 있는 가장 보편적인 방법은 스트레인게이지를 차륜에 부착하여 차륜이 받는 수직하중과 수평하중을 측정함으로써 탈선계수를 계산하는 것이다. 스트레인게이지를 이용한 탈선계수 측정 시 회전하는 차륜으로부터 데이터를 확보해야 하므로 측정용 특수 차축과 회전부위의 신호전달을 위한 장비가 필수적이다.

이 경우 스트레인게이지 부착, 브리지 회로 구성, 신호튜닝 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.

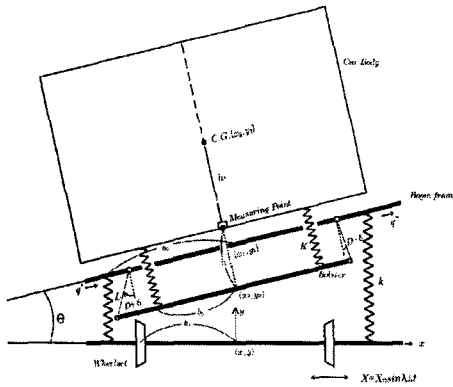


그림 1. 철도차량 모델

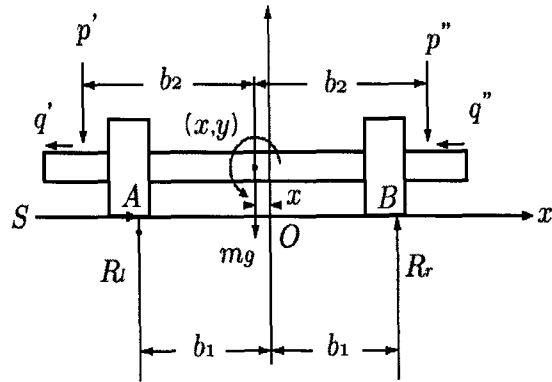


그림 2. wheelset의 모델

그림 1.과 같은 차량모델과 그림2의 차축에 작용하는 모든 힘의 평형을 고려하여 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^(3, 4, 5).

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

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

$$[R_l] < [R_r] \text{ 일 때, 주행안정도는 } [R_l]/[S]_{abs}$$

$$[R_l] > [R_r] \text{ 일 때, 주행안정도는 } [R_r]/[S]_{abs}$$

여기서, R_l, R_r 은 좌우 차륜이 궤도로부터 받는 반력(수직 하중)이며, S 는 차륜이 궤도에 미치는 횡압(우측을 양으로 함)이다.

3. 본선주행시험

기존측정방법인 차량의 차륜에 부착한 스트레인게이지로부터 윤중과 횡압을 측정하고 또한 다른 방법으로 윤중과 횡압을 얻기 위해 이와 관련성이 있다고 판단되는 변위 4채널과 진동가속도 6채널을 정하여 실제 주행시험에서 측정하였다. 시험구간은 인천공항철도의 인천공항역에서 김포공항역, 시험대상차량은 직통형차량으로 하중조건은 만차조건으로 하였다. 측정용 윤축에서 발생하는 하중 신호를 차량 내에서 실시간으로 확인하고 저장하기 위해서 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⁽⁶⁾.

3.1 측정기기의 구성 및 구축

탈선계수를 차륜으로부터 측정하기 위한 측정시스템은 그림 3과 같이 구성된다. 그림에서 보는 바와 같이 회전체에서 고정체로 신호를 전달하는 방법은 PCM Telemeter를 사용하는 방법과 Slip Ring을 사용하는 방법이 있다. Data를 판독하는 경우도 스트레인 게이지에서 나오는 출력신호를 증폭하여 Oscillographic Recorder에 기록하고 수작업으로 적용하는 방법과 Data Recorder에 기록하여 Signal Processor로 분석하는 방법이 있다. 이때 각 기기의 조정은 신호 파형을 판독하기에 적절한 상태로 감도를 조정한다.

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

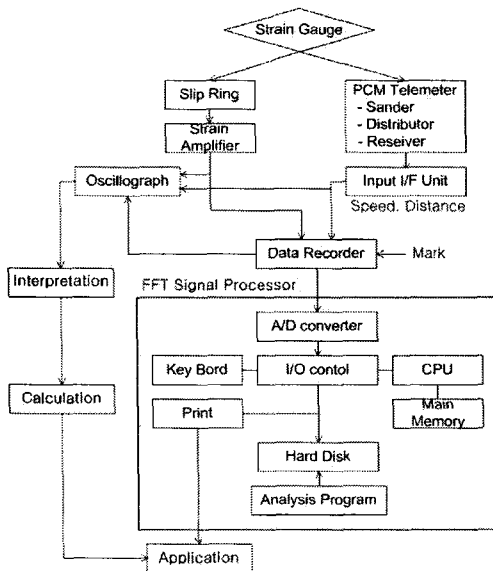


그림 3. 측정시스템 Block diagram

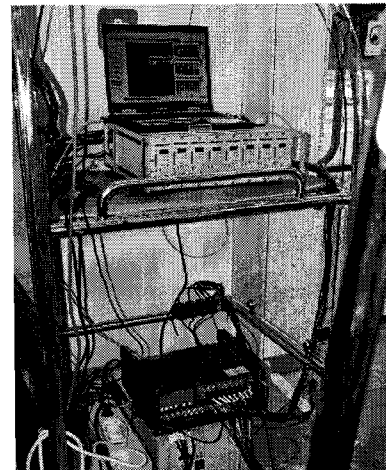


그림 4. 실제 측정시스템

3.2 윤증과 횡압이 관련된 진동과 변위의 측정

탈선계수는 좌우차륜에 윤증과 횡압을 얻기 위해 8채널을 측정하였다. 진동가속도는 그림 5와 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 4채널을 측정하였다(그림 6).

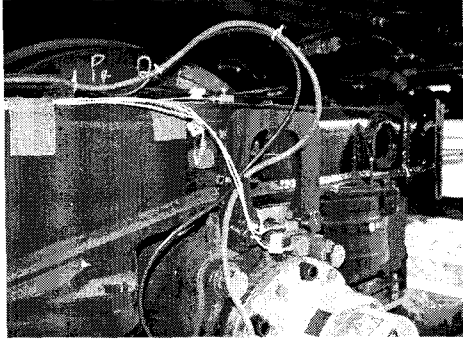


그림 5. 윤증/횡압과 진동가속도 센서

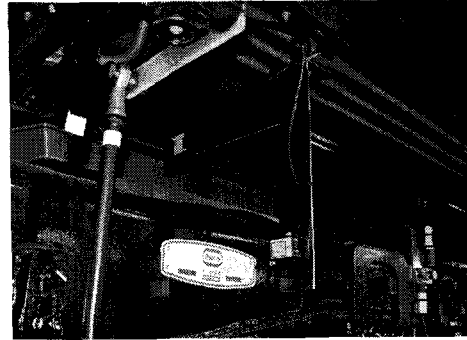


그림 6. 차체와 대차의 상대변위센서

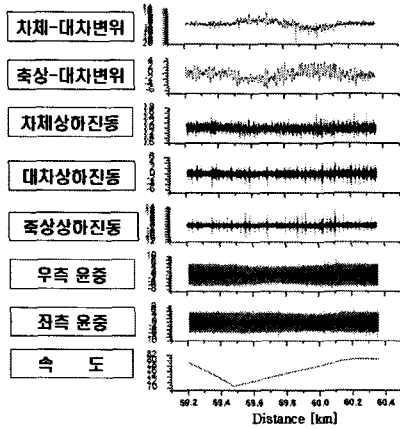


그림 7. 상하방향 측정신호성분

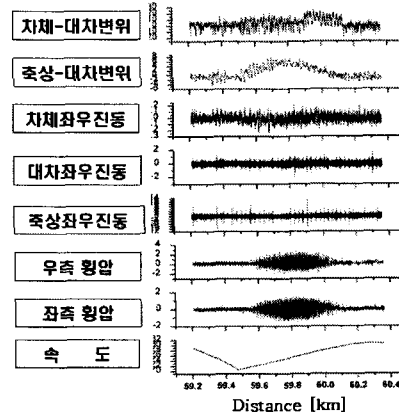


그림 8. 좌우방향 측정신호성분

그림 7과 그림 8은 시험차량이 곡선반경 1000m를 주행하였을 때 윤증과 관련된 상하방향과 횡압과 관련된 좌우방향의 신호성분을 구분하여 비교한 것으로서 레코더 뷰어 프로그램을 이용한 로우 데이터이기 때문에 환산값을 반영하지 않고 신호 종류간의 경향만을 파악한 그림이다.

4. 주행시험결과 및 분석

4.1 윤증과 관련된 신호성분

그림 7의 상하방향 신호성분들은 모두 윤증의 신호성분에 기여를 하거나 영향을 미친다. 특히 차체-대차사이의 변위와 축상-대차사이의 변위는 뚜렷하게 연관성을 갖고 있음을 볼 수 있다. 이 2채널의 변위가 윤증에 얼마나 선형적으로 기여하고 있는가를 집중분석하였으며, 그 결과 그림 9와 같이 차체-대차사이의 변위보다 차축-대차사이의 변위가 곡선별로도 선형적으로 기여하고 있음을 알아냈다.

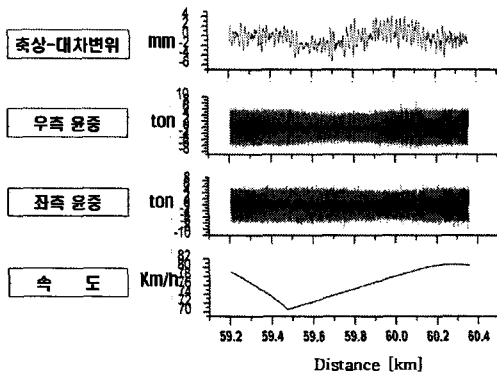


그림 9. 운중관련 신호성분

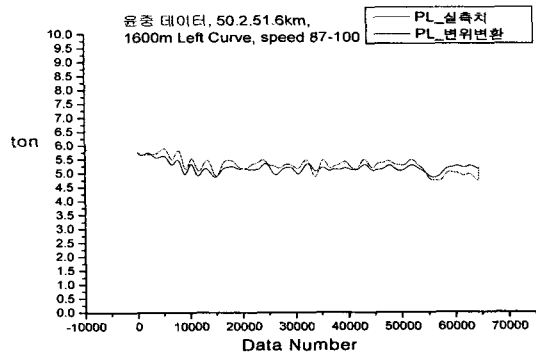


그림 10. 실측과 변위신호의 운중데이터 비교

차축과 대차간의 수직변위(D_p)를 측정한 데이터로 운중을 구하기 위해 식을 만들어 적용한 결과를 그림 10.에 나타내었다. 변위와 운중사이의 관계 분석은 $F = k\delta$ 식을 기본으로 하였으며, 분석방법은 측정된 D_p 데이터에 수직강성을 곱하고 정적운중을 더해주면 아래와 같이 운중(P_L) 관계식을 얻었다.

$$P_L = \frac{D_p k}{10} + P_{L_0} = \frac{\text{차축과대차간수직변위} \times \text{수직강성}}{10} + \text{정적운중} \dots\dots\dots(1)$$

4.2 횡압과 관련된 신호성분

그림 8.의 횡압과 관련된 좌우방향의 신호들은 곡선부 주행시에 하중과 변위가 일정한 연관성을 가지는 것으로 나타났다. 특히, 좌우방향은 차체-대차사이의 변위와 축상-대차사이의 변위, 그리고 차체좌우진동가속도의 정상횡가속도가 뚜렷하게 연관성을 갖고 있음을 볼 수 있다. 이 2채널의 변위와 1채널의 진동가속도가 횡압에 얼마나 선형적으로 기여하고 있는가를 집중분석하였으며, 그 결과 그림 11.과 같이 변위보다는 차체좌우진동가속도의 정상횡가속도가 곡선별로도 선형적으로 기여하고 있음을 알았다.

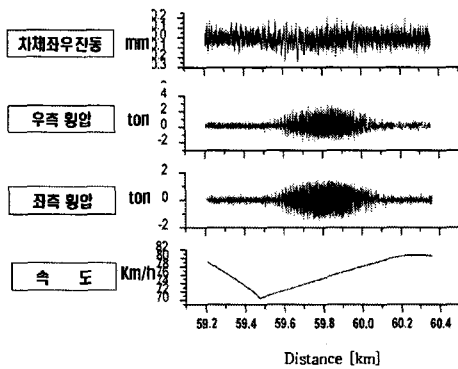


그림 11. 횡압관련 신호성분

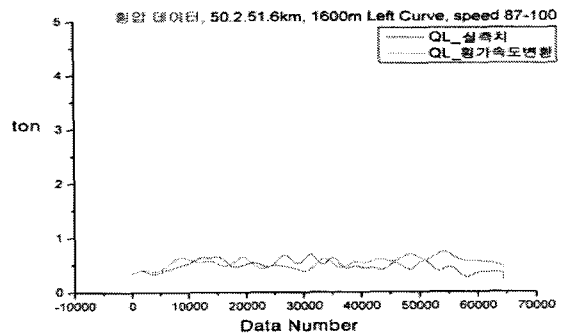


그림 12. 실측과 정상횡가속도신호의 횡압데이터 비교

차체의 횡방향가속도의 정상횡가속도(α)를 측정한 데이터로 횡압을 구하기 위해 식을 만들어 적용한 결과를 그림 12.에 나타내었다. 실측치와 변환된 데이터가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 변위와 운중사이의 관계 분석은 $F = m\alpha$ 식을 기본으로 하여, 측정된 정상횡가속도 α 데이터, 외측궤도에 대한 커

브계수 $A=1.7$ 과 질량을 곱해주면 아래와 같은 횡압(Q_L) 관계식을 얻었다.

$$Q_L = Am_L\alpha = \text{커브계수}(A) \times \text{질량} \times \text{정상횡가속도}(\alpha) \dots\dots\dots(2)$$

4.3 결과분석

철도차량의 탈선계수를 구하기 위해서는 윤중과 횡압 측정을 통해 평가를 수행하는데 측정은 차륜에 스트레인 게이지를 부착하여 여기서 출력신호를 측정한다. 이렇게 윤중과 횡압을 측정하는 방식은 측정 장치 부착의 어려움, 고도의 측정기술, 준비시간 소요, 고비용의 문제가 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 측정하기가 비교적 쉬운 변위와 진동가속도 측정을 통해 윤중과 횡압을 구하는 방법을 제시하고자 하였다.

그동안 국내외 문헌과 이론으로만 알려져 오던 진동특성과 윤중/횡압 관계는 지금까지의 분석결과로 볼 때 직접적인 연관관계보다는 차량의 현가장치와 질량 특성에 따라 차종마다 달라지는 함수일 것으로 예측되어 왔었다. 우리나라에도 수십가지 종류의 차량들이 운행되고 있는 실정에서 진동특성과 탈선계수의 관계식을 정립하자면 차종별, 곡선종류별, 운행속도별로 수많은 검토가 이루어져야 하는 것으로 판단하고 여러 방법으로 시도한바 있다.

현재 시점에서 유용한 방법은 윤중과 횡압을 구하는 경우 앞에서 얻은 (1)과(2)식을 이용해서 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 이 방법은 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.

5. 결론

실차에서 측정한 변위, 진동가속도, 탈선계수 데이터를 분석한 결과 기존의 평가방법인 차륜에 스트레인게이지를 부착하여 측정 평가하는 방법이 아닌 다음과 같은 다른 방법으로 예측 가능한 결과를 확인하였다. 이 방법은 차량에서 진동가속도와 변위를 측정하여 기준치 이상의 데이터가 평가될 경우 안전성의 위험이 존재하므로 기존의 정밀측정을 하거나 위험개소를 정비하거나 개선하여 차량주행 안전성 확보에 큰 도움을 줄 것으로 판단된다.

- (1) 본 연구를 통하여 윤중과 횡압을 구할 수 있는 2개의 관계식을 얻었다.
- (2) 실차에서 차축과 대차사이의 수직변위를 측정하여 윤중(P)의 예측하고, 진동가속도계로 차체에서 측정한 정상횡가속도로서 횡압(Q)의 예측이 가능하다.
- (3) 진동가속도와 변위를 통해 예측된 윤중과 횡압으로 철도차량의 주행안전성을 평가할 수 있을 것으로 본다.

참고문헌

- (1) 홍용기 외, 철도차량의 진동과 변위로부터 유추할 수 있는 탈선가능성에 관한 연구, 한국철도학회 2007년 춘계학술대회 논문집, pp.743-748, 2007. 5. 17
- (2) 함영삼, 철도차량의 탈선메커니즘 연구동향, 철도웹진 58호, 한국철도기술 Vol. 06, pp. 23~29, 2006. 03+04
- (3) 오키시마 키하치, 열차 탈선 방지의 이론과 실제, 1960, 교우사
- (4) 오키시마 키하치, 철도차량 특론, 1965, 교우사
- (5) 이관섭 외, 철도차량의 진동특성에 의한 탈선영향 해석, 한국정밀공학회 2005년도 춘계학술대회논문집, pp. 355~360, 2005. 6. 23
- (6) 함영삼 외, 인천국제공항철도 통근형 차량의 주행안전성 평가, 한국철도학회 2006년도 추계학술대회논문집, 2006. 11. 9