

◆ 특집 ◆ 철도의 고속화를 위한 차륜-궤도 인터페이스

철도차량의 탈선계수와 궤도선형간의 상관관계에 관한 실험적 연구

The Experimental Study about a Correlation between the Derailment Coefficient of the Railway Vehicle and the Track Alignment

함영삼^{1,✉}, 이동형¹, 권석진¹, 서정원¹
Young Sam Ham^{1,✉}, Dong Hyung Lee¹, Seok Jin Kwon¹ and Jung Won Seo¹

¹ 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 (Vehicle and Track Research Department, Korea Railroad Research Institute)
✉ Corresponding author: ysham@krii.re.kr, Tel: 031-460-5202

Manuscript received: 2010.5.24 / Revised: 2010.6.21 / Accepted: 2010.6.29

When a vehicle is running, wheel is generating vertical and lateral force on the rail, in addition to load of vehicle, through a complicated set of motions. The derailment coefficient refers to the ratio of lateral force to vertical force(wheel load), and if the value exceeds a certain level, a wheel climbs or jumps over the rail. That's why the value is used as a criterion for running safety. Derailment coefficient of rolling stocks alters according to shape of rail track. I measured three-dimensional angular velocity and acceleration to use 3D Motion Tracker. Test result, derailment coefficient of rolling stocks and shape of rail track examined closely that have fixed relation. Specially, was proved that roll motion has the close coupling relation.

Key Words: Derailment Coefficient (탈선계수), Wheel Load (윤중), Lateral Force (횡압), Running Safety (주행안전성), Track Alignment (궤도 선형)

기호설명

- P = Wheel Load (Vertical Force, ton)
- Q = Lateral Force (ton)
- B = Bending Load (ton)
- α = Contact Angle between Wheel and Rail
- μ = Coefficient of Friction between Wheel and Rail
- ϵ_{bp} = Output of Bending Gauge by Vertical Force (V/ton)
- ϵ_{bq} = Output of Bending Gauge by Lateral Force (V/ton)

1. 서론

철도차량의 주행안전성을 평가하는 핵심항목

중의 하나는 탈선계수이다. 철도차량의 탈선계수는 선로의 형상에 따라 변화한다. 탈선 또는 주행 안전도를 평가하는 대표적인 기준은 탈선계수로서 이를 정확히 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으며, 현재까지 국내에서 사용하고 있는 가장 보편적인 방법은 스트레인 게이지를 차륜에 부착하여 차륜이 받는 수직방향 하중과 수평방향 하중을 측정함으로써 탈선계수를 계산하는 것이다. 스트레인 게이지를 이용한 탈선계수 측정시 회전하는 차륜으로부터 데이터를 수신해야 하므로 측정용 특수 차축과 회전체에서의 신호전달을 위한 장비가 필수적이다. 이 경우 스트레인 게이지 부착, 브리지 회로 구성, 신호 튜닝 등에 많은 시간과 경비

가 소요되고, 회전부위에서 장비나 게이지가 파손되는 경우가 있으며, 노이즈로 인한 데이터의 부정확성 등 크고 작은 난점들이 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.¹ 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. 이전의 연구에서 차량의 진동가속도와 변위가 윤중과 횡압에 미치는 영향을 검토한 결과, 차체와 대차 프레임 사이에서 발생하는 상대변위가 횡압에 가장 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.² 진동가속도 성분 중에서는 축상위치와 대차 프레임 위치에서는 하중과의 상관관계를 구하려면 추가적이고도 특별한 방법이 검토되어야 한다. 그러나 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. 본 논문에서는 3D Motion Tracker 를 이용하여 3 차원의 각속도와 가속도를 측정하여 궤도선형과 차량의 탈선계수가 어떠한 연관을 가지는지를 밝히고자 하였다. 본선주행시 힘을 통하여 차량의 탈선계수와 선로의 형상은 일정한 비율로 연동된다는 것을 규명하였고, 특히 Roll Motion 이 가장 밀접한 관계를 가진다는 것을 밝혀냈다.

2. 철도차량의 주행안전성

탈선계수란 차륜과 레일의 접촉점에서 발생하는 수직하중과 수평하중의 비율을 의미하는 것으로서 수평하중이 증가할수록 탈선의 위험성이 높아진다고 할 수 있다.³ 탈선에 관한 문제는 횡압을 제거함으로써 모든 문제를 해결한다 해도 과언이 아니다. 그만큼 윤중감소보다 횡압의 증가가 위험하기도 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. 차량이 주행할 때 레일과 차륜은 차량의 하중 외에 주행시의 복잡한 운동으로, 차륜은 레일에 수직방향의 힘과 수평방향의 힘을 작용시킨다. 이 수평방향의 힘(횡압 Q)에 대한 수직방향의 힘(윤중 P)의 비(Q/P)를 탈선계수라 하며 이 값이 일정치를 넘으면 차륜이 레일을 올라타거나 뛰어넘어 탈선을 하게 되므로 주행안전성 검토의 기준이 된다. 탈선계수의 해석은 정적해석과 동적해석으로 구별되며 Fig. 1 과 같은 상태에서의 정적해석은 접촉점에서 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\left(\frac{Q}{P}\right) = \frac{\tan \alpha \mp \mu}{1 \pm \mu \tan \alpha} \tag{1}$$

식에서 분자의 -와 분모의 +는 타오르기 탈선, 분자의 +와 분모의 -는 뛰어오르기 탈선을 나타내고, 이것은 차륜이 레일을 미는 힘, 즉 횡압의 작용시간으로 구별하여 1/20 초 이하를 뛰어오르기 탈선, 1/20 초 이상을 타오르기 탈선으로 적용한다.

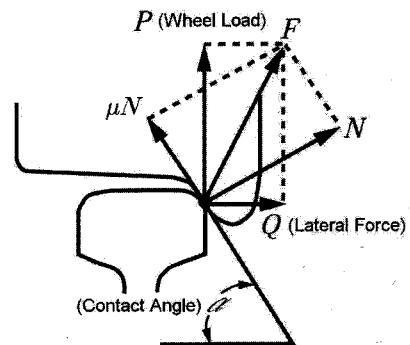


Fig. 1 Contact forces between wheel and rail

3. 궤도선형과 탈선계수 계측시스템

3.1 측정 원리

기존의 측정시스템으로 탈선계수를 측정하여 궤도선형과 비교를 하였다. 먼저 차륜과 레일 사이에서 발생하는 상호 작용력을 측정할 수 있는 계측시스템으로는 무선 텔레메트리 방식을 채택하였다.⁴ 편성열차의 앞쪽에 위치한 차량에서 전부대차의 1 위축에 해당하는 좌우의 차륜에 Fig. 2 와 같이 스트레인 게이지를 부착하여 브릿지 회로를 결선하였다. 측정용 윤축에는 Fig. 3 과 같이 무선으로 신호를 전송하도록 차륜의 안쪽에 신호 발신기가 내장된 Telemeter 송신기를 설치하고 차체 하부에 신호 수신기를 설치하였다. 차량의 실내에는 Fig. 4 와 같이 데이터 처리장치를 배치하여 측정시스템을 구성하였다. Transmitter 에는 배터리를 내장시켜 별도의 전원공급 없이 신호를 전송하도록 하고, 차축의 회전과 충격에 견딜 수 있도록 지그를 견고하게 제작하여 설치하였다.⁵ Transmitter 에서 발생된 신호는 안테나를 통해 Receiver 로 전달되어 Data Recorder 에 저장되도록 구성하였다. 그리고 궤도선형을 계측하는 데에는 Fig. 5 와 같은 자이로스코프 센서의 일종인 3D Motion Tracker 를 이용하였다. 이것은 디지털 관성 항법 측정장치로 3 차원의 각속도와 가속도, 자기장 영역, 온도 등을 측정할 수 있는 센서로서 본 연구에서는 X, Y, Z 방향의 각속도와 가속도를 탈선계수 데이터와 비교하였다. 측정에 사용된 센서와 장비들은 Fig. 6 과 같이 구성하였다.

3.2 계측 장치

측정에 사용된 센서와 장비들은 다음과 같다.

- ① Measuring Wheel set ; 차륜과 레일의 작용력을 측정할 수 있도록 차륜의 변형량을 센싱하여 하중으로 환산하는 스트레인 게이지를 부착한 측정용 윤축
- ② Telemetry system ; 회전체 윤축에서 고정체 차체로 신호를 전송하는 장치
 - Telemetry Transmitter
 - Battery Powered Transmitter Carrier
 - Telemetry Receiver
- ③ Speed sensor ; 윤축 1 회전당 1 펄스씩 감지하여 속도와 거리를 연산
- ④ Data Recorder ; 계측되는 신호 데이터를 저

장하는 장치

- ⑤ 노트북 ; 계측현장에서 신호를 모니터링하고 제어하는 역할
- ⑥ Signal Processor ; 연구실에서 계측된 데이터를 재생하면서 신호를 처리
- ⑦ 3D Motion Tracker ; 3 방향의 각속도와 가속도를 측정

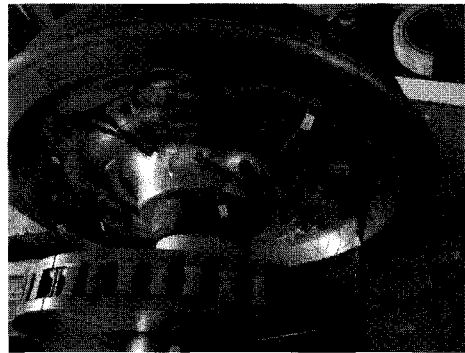


Fig. 2 Measuring Wheel set

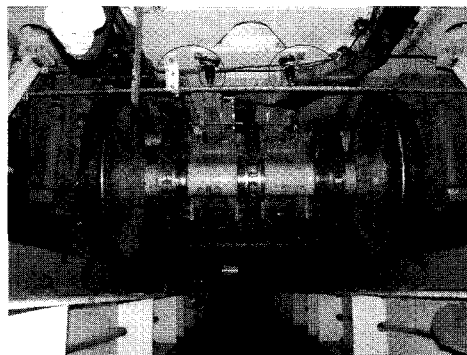


Fig. 3 Telemetry Transmitter & Antenna

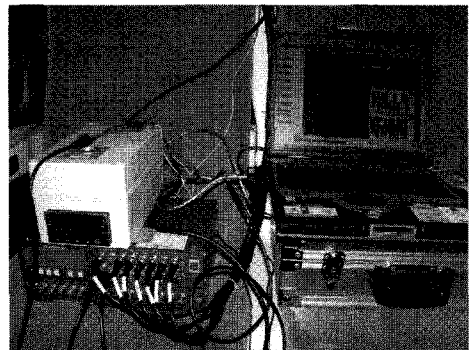


Fig. 4 Data Recorder & Measuring Equipment

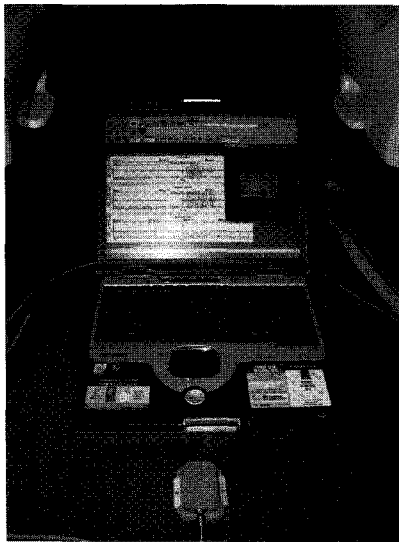


Fig. 5 Motion Tracker

- 일자 : 2009. 6. 25
- 시험구간 : 경부 고속선 천안아산 - 광명
- 시험대상차량 : KTX-II
- 열차에서의 측정위치 : 단부객차

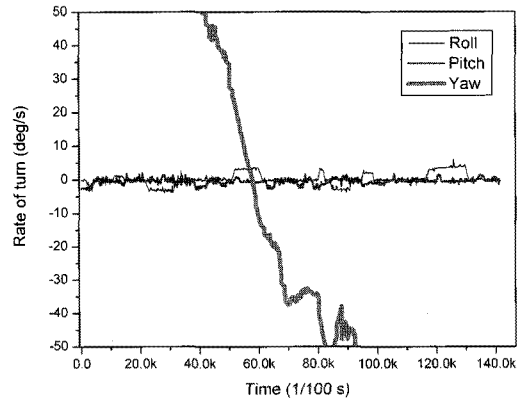


Fig. 7 Test results of rate of turn

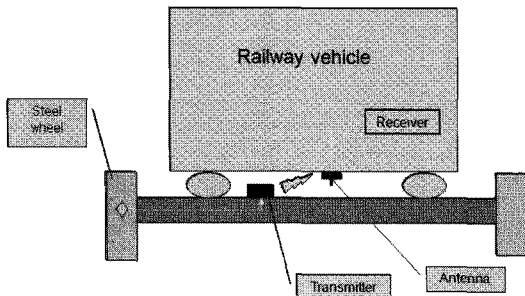


Fig. 6 Formation of measuring system

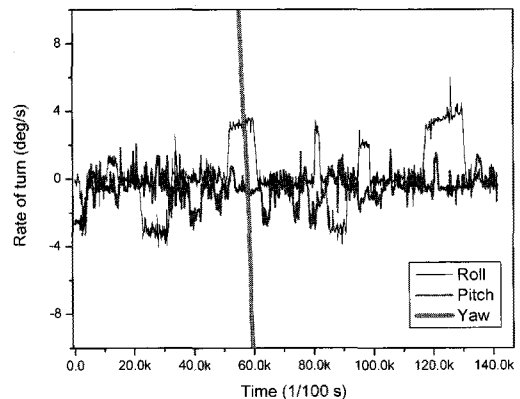


Fig. 8 Test results of rate of turn(zoom)

4. 실차시험

4.1 궤도선형과 탈선계수

철도의 선로는 사회의 요구에 따라 국토상에 형성되지만, 그 형상을 직선만으로 만드는 것은 불가능하며, 지형에 따라 이것을 연결하는 평면과 중(연직방향)의 곡선을 필요로 한다. 또한 그때 완전하게 원활한 선로를 실현할 수는 없으므로 불가피하게 소정의 형상으로부터 틀림이 발생한다. 평면틀림을 선형이라 부르고, 종방향 틀림을 궤도틀림이라 하는데, 본 연구의 핵심내용인 궤도선형과 탈선계수와와의 상관관계를 규명하기 위하여 경부고속철도가 운행되고 있는 선로에서 실차주행시험을 실시하였다. 시험구간은 반경 7,000 m의 곡선과 직선이 혼재된 구간으로서, 시험조건은 다음과 같고, 시험결과는 Fig. 7~10 과 같다.

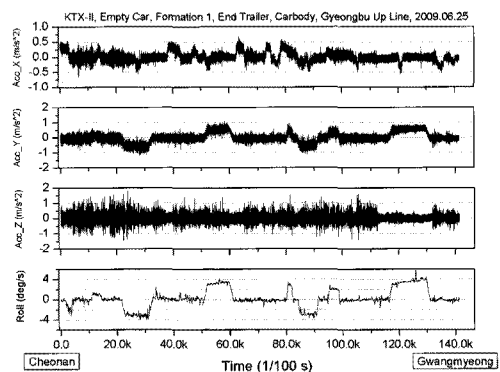


Fig. 9 Test results of acceleration & roll motion

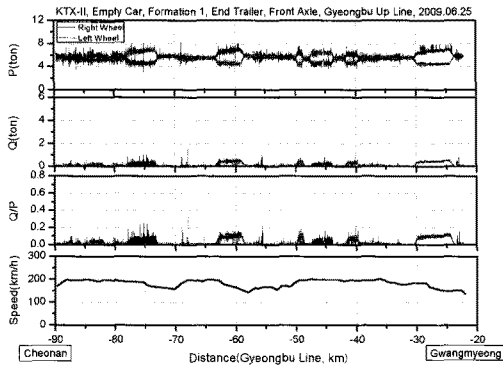


Fig. 10 Test results of derailment & speed

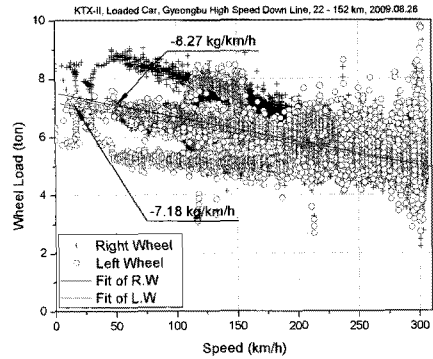


Fig. 12 Test result of total data

4.2 주행속도와 윤중 변화

주행속도와 윤중과의 상관관계를 규명하기 위하여 고속철도가 운행되고 있는 경부선에서 2009년 8월 26일에 광명에서 대전까지의 구간에서 실차주행시험을 실시하였다. 지금까지 일부에서 주행속도는 윤중의 변동폭을 증가시킬 뿐이므로 평균윤중은 변화가 없을 것이라는 이론도 있었기에 실제 현상을 계측하여 이를 증명하고자 하였다. 경부선 하행선로에서 단부객차에 3,225 kg (43 석 × 75 kg/석)의 하중을 적재하고 최고운행속도 300 km/h로 운행할 때, 즉 측정용 윤측이 열차의 후부측 단부대차 후부측에 위치할 때 광명-대전초차장 구간의 고속선에서 윤중을 측정한 결과는 Fig. 12~13 및 Table 1 과 같이 나타났고, 윤중감소율은 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 빈도누적확률 0.001 %에서 50 % 정도로 분석되어 철도차량 안전기준에 관한 규칙을 적용할 때 안전한 것으로 나타났다.⁶

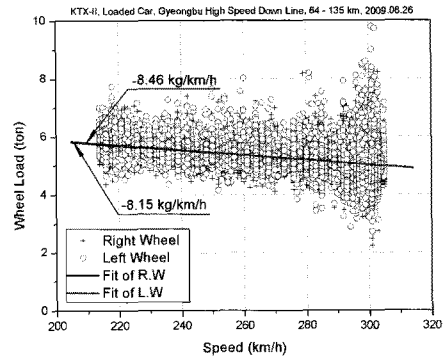


Fig. 13 Test result of wheel load in straight line

Table 1 Slope of wheel load

Section (km)		Slope of wheel load (kg/km/h)
22-152 (Straight + Curve Line)	Right	- 8.27
	Left	- 7.18
64-135 (Straight Line)	Right	- 8.15
	Left	- 8.46

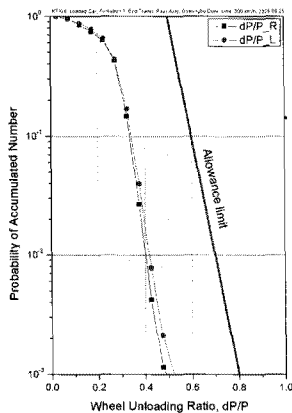


Fig. 11 Test result of wheel unloading ratio

5. 결론

속도가 일정한 구간에서 고속철도차량을 이용하여 궤도선형과 탈선계수의 상관관계를 측정 분석한 결과는 (1)~(3)과 같고, 주행속도에 따른 윤중의 변화를 분석한 결과는 (4)~(5)와 같다.

(1) 측정된 요잉 모션은 선로선형과의 연관성을 찾을 수 없고, 시간에 따라 변화되고 있어 지구의 자전에 따른 영향을 보정하여야 할 것으로 판단된다.

(2) 곡선반경과 캔트 등 선로상태와 가장 연관이 깊은 항목은 좌우방향의 진동가속도와 롤 모션이라고 할 수 있다. 특히 Roll Motion 은 윤중의 변화 형상을 증폭하여 재현한 것처럼 매우 잘 일치하고 있었다.

(3) 동일한 차량이 일정한 속도로 주행할 때 Roll Motion 이 변하는 것은 선로의 형상에 의한 것이라 할 수 있으며, 1 톤의 윤중 변화에 약 2(deg/s)의 Roll Motion 이 변화하는 것을 감지할 수 있었다.

(4) 철도차량이 곡선 선로에서 일정속도 이상으로 주행할 때 내궤측 윤중은 감소하였고, 외궤측 윤중은 증가하였다.

(5) 직선 선로에서 철도차량이 200 km/h 이상의 속도로 주행할 경우에는 속도가 1 km/h 증가할 때 마다 약 8.3 kg 의 윤중이 감소하였다.

참고문헌

1. Ham, Y. S., Lee, D. H., Kwon, S. J., You, W. H. and Oh, T. Y., "Continuous Measurement of Interaction Forces between Wheel and Rail," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 10, No. 1, pp. 35-39, 2009.
2. Hong, Y. K. and Ham, Y. S., "A Study on Derailment Possibility that can Analogize from Vibration and Displacement of Rolling Stocks," Proc. of Korean Society for Railway Spring Conference, pp. 84-89, 2007.
3. International Union of Railways, "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Running behaviour, 4th Edition," UIC CODE 518, 2009.
4. Ham, Y. S., Lee, D. H. and Oh, T. Y., "Wireless measuring system to estimate running safety of tilting vehicles," Proc. of Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 809-810, 2007.
5. Ham, Y. S., Seo, J. W., Lee, D. H., Kwon, S. J., Kim, J. C. and Lee, C. W., "Measurement & analysis of derailment coefficient for korean tilting vehicle," Proc. of Korean Society for Railway Autumn Conference, pp. 1628-1633, 2008.
6. Railroad Safety Law, "Rule about safety level of rolling stocks," Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Notification No. 35, 2008.