

# 한국형 고속철도차량의 주행안전성 평가

## Evaluation of running safety for korean high speed railway vehicle

함영삼\* 허현무\*\*  
Ham, Young-Sam Hur, Hyun-Moo

### ABSTRACT

The railroad is a means of large transportation which has many talents such as a safety and a regularity. That is a results from various confidential performance tests and evaluations of the system. The railroad system consist of various subsystems - vehicle, power supply, signal, communications, track structures, operations, etc. Among them, as an item of safety evaluation there is a measurement of wheel/rail force, so called a measurement of derailment coefficient. This is a very important item because a derailment of a train will bring about a big accident. Especially it is more important in high speed rail of which operation speed is over two times as fast as existing rail. In this paper, it is introduced to preprocess the wheelset for measuring wheel/rail force of high speed rail, such as to treat a measuring wheelset, adhesion of strain gauges and static load test, running test result of main line.

### 1. 서론

철도차량의 주행안전성을 저해하는 중요한 요인은 탈선이다. 철도에 있어서 탈선은 대형사고로 직결되기 때문에 결코 쉽게 간과할 수 없는 부분이며, 철도가 다른 교통수단에 비하여 상대적인 장점으로 내세울 수 있는 안전성을 확보하기 위해서는 반드시 탈선계수를 측정하여 주행안전성을 평가하여야만 한다. 대부분의 철도차량은 쉽게 탈선하지 않는다. 그것은 차량이 직선과 곡선선로 및 분기기 등 기준대로 만들어지고 보수된 선로 위를 주행하고 있기 때문이다. 물론, 차량도 정해진 허용 한도 내로 수선하면서 사용되고 있고, 제한 속도를 지키며 운전되고 있다. 탈선에 대한 안전의 문제는 이처럼 다양한 요인이 관계되고 복잡하기 때문에 철도차량의 탈선계수를 측정하고 평가하는 것은 결코 쉽지 않은 일이다.

탈선현상의 이해는 아직 명쾌하게 밝혀지지 않고 있다. 실제의 차량이 어떤 자세와 어떤 상태로 주행하고 있는가, 차량의 제원이나 선로의 상황, 주행속도 등이 탈선에 대한 안전성에 어떤 영향을 미치고 있는가. 이런 것들은 정성적으로 이해할 수 있지만 정량적·구체적인 문제에 들어가면 data가 없거나, 설명할 수 없는 것 등이 있다. 본 연구에서는 지금까지 정립된 탈선이론과 경험을 바탕으로 고속철도차량의 차륜/궤도 작용력 측정을 위한 측정용 윤축의 제작과 정하중 시험, 그리고 본선주행시험 등을 실시한 결과에 대하여 기술하고자 한다.

\* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 책임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 선임연구원, 정회원

## 2. 탈선계수 측정용 윤축

### 2.1 윤축가공 및 게이지 부착위치 선정

고속전철 동력차의 윤축은 차륜의 플레이트 부위가 곡면이기 때문에 수직하중과 수평하중간 상호간섭이 발생할 수밖에 없는 구조이다. Fig. 1은 탈선계수 측정을 위한 윤축 가공도면으로 리드 선·인출을 위하여 좌우의 차륜이 대칭이 되도록 직경 20mm의 홀을  $60^\circ$  각도로 드릴 가공하였으며, 차륜직경이  $\varnothing 920\text{mm}$ 이므로 수직하중 검출용 게이지 부착을 위해  $\varnothing 538\text{mm}$  위치에 지름 60mm인 구멍을  $90^\circ$  간격으로 가공하였다.

윤축의 가공에 따른 구조적 안전성 검증과 스트레인 게이지를 부착하는 위치 선정은 이론해석으로 검증하였으며, 정확한 부착위치 결정은 Fig. 2와 같은 응력집중 게이지를 부착하여 수직하중과 수평하중 사이에 상호간섭은 적으면서도 출력감도는 큰 지점을 선택하였다.

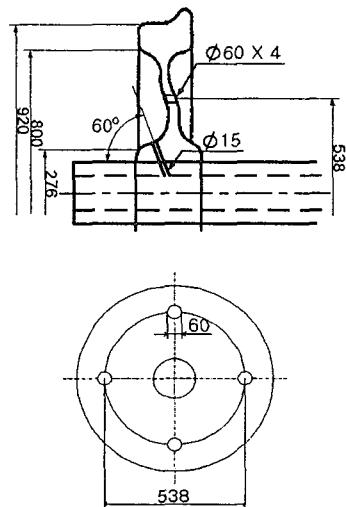


Fig. 1 윤축 가공도



Fig. 2 응력집중 게이지

### 2.2 게이지 부착 및 결선

철도차량의 탈선계수를 측정하기 위한 브릿지 결선방법은 간헐법과 연속법의 2가지 종류가 있는데, 간헐법은 차륜의 회전마다 정현파의 출력신호를 얻는 방법이고, 연속법은 연속적으로 출력이 얻어지는 방법이다. 본 과제에서는 Fig. 3~4와 같이 간헐법으로 브릿지 회로를 구성하였다.

실제 측정용 윤축에서는 윤중과 횡압의 상호간섭이 최소인 위치를 선정하기 위해 해석결과를 토대로 선정한 위치에 응력집중 측정용 스트레인 게이지를 부착하고 정하중 시험을 실시하여 수직하중과 수평하중 상호간에 간섭이 가장 적으면서도 감도가 큰 지점을 선택하였다.

Fig. 5~6에서 보는 바와 같이 수직방향 응력집중 측정용(P) Gauge의 경우 수직하중 작용시에 변형률은 외측에서 멀어질수록 증가하였으며 수평하중 작용시에는 중간지점에서 압축과 인장이 교차되는 것을 알 수 있었다. 따라서 간섭량이 0인 지점은 좌우 차륜 모두 외측에서 내측으로 13.9mm 떨어진 지점으로 확인되었고 수평방향 응력집중 측정용(Q) Gauge의 경우 간섭량 증가에 비해 감도 증가율이 큰 지점을 선택하여 외측은 Hub 끝단에서 74mm, 내측은 164mm 떨어진 지점으로 선정하였다.

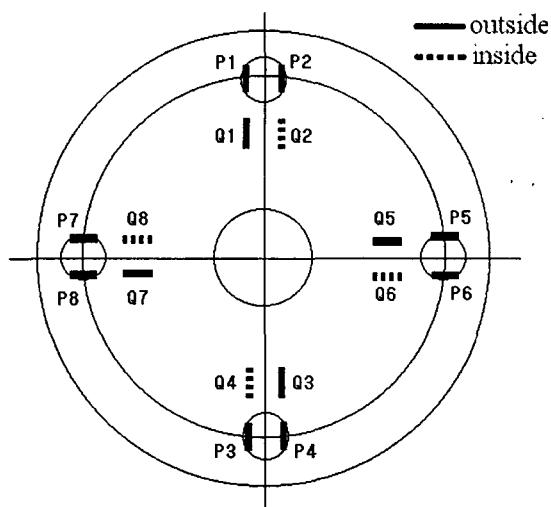


Fig. 3 스트레인 게이지 부착위치

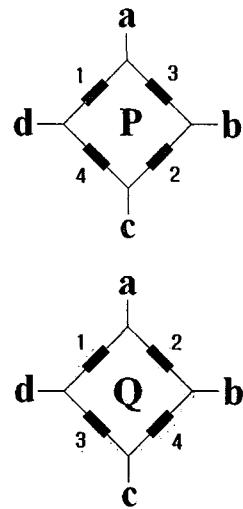


Fig. 4 휘스톤 브릿지 결선

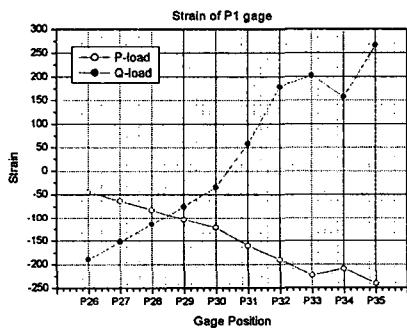


Fig. 5 P Gauge에 따른 변형량과 간섭량

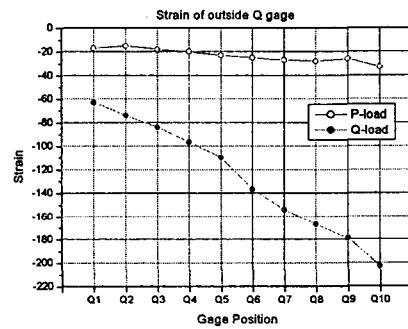


Fig. 6 Q Gauge에 따른 변형량과 간섭량



Fig. 7 정하증시험

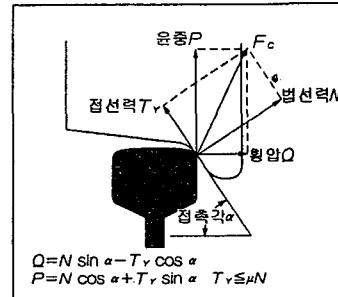


Fig. 8 차륜/레일 사이의 작용력

### 3. 시험기준

#### 3.1 탈선계수(Q/P)

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.

Fig. 8과 같은 상태에서의 정적해석은 접촉점에서 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 식이 성립하며, 탈선계수의 안전기준은 빈도누적확률로 나타내어 100%일 때 0.8, 0.1%일 때 1.1 이하이다.

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

#### 3.2 윤중감소비( $\Delta P/P$ )

차량의 진동이나 중심의 편기, 궤도 및 차량의 평면성 틀림, 곡선에서의 켄트 및 원심력, 풍압 등에 의해 윤중의 감소가 발생한다. 이때 윤중 감소치( $\Delta P$ )에 대한 정적인 윤중(P)의 비를 윤중감소비라 하며 이 값이 허용한도를 초과하면 탈선의 위험이 있다. 윤중감소비의 기준은 정적인 윤중감소의 경우  $\Delta P/P \leq 0.6$ 이고, 동적인 윤중감소는 빈도누적확률로 10%일 때 0.6, 0.1%일 때 0.8 이하이다.

#### 3.3 횡압(Q)

정적윤중이 차량의 자중만큼만 검출된다면 횡압은 0이라고 볼 수 있다. 그러나 차량이 주행하게 되면 윤중감소가 발생하고 아울러 차륜 플랜지와 레일의 접촉으로 횡방향 하중이 발생하는데 이것을 횡압(Q)이라고 부른다. 어떠한 경우에라도 횡압이 윤중보다 커지게 되면 탈선의 위험성은 그만큼 높아지는 것이다.

차륜의 횡압이 과도하게 작용하는 경우에는 레일이 지지하지 못하고 넘어 가거나(roll over), 옆으로 밀리는 현상(shift)에 의해 차량이 탈선하는 경우가 있다. 이 경우에는 궤도에 작용하는 수직력과 연계된 횡압허용기준으로 판단하는 데 궤도구조 및 강도에 따라 이 기준이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 궤간확대에 대한 횡압한도로서 침목 고정못에 작용하는 압력이 항복점에 도달하고 타이플레이트가 있는 경우의 한도를 적용하였으며, 이것은 외궤측으로의 횡압에 저항하는 침목 고정못이 2개이고 여기에 작용하는 압력이 항복점에 도달할 때를 기준으로 하여 탈선계수가 0.9를 넘지 않는 범위에서 횡압  $Q \leq 2.9+0.3P$ 를 허용한도로 설정하였다.

### 4. 정하중 시험 및 교정값 산출

Fig. 7과 같이 수직하중 20ton과 수평하중 5ton을 각각 부과하여 상호간섭을 측정하였으며 모든 Gauge들에서 하중이 증가함에 따라 선형적으로 변형량이 증가하는 것을 볼 수 있었다.

최종적으로 부착된 Gauge의 이상유무를 확인하고 실차시험 결과에 적용할 교정값을 구하기 위해 4개의 구멍위치에서 각각 수직·수평 정하중 시험을 실시하여 하중과 변형율의 관계를 유추하고 선형성을 검토하였다. 차륜면에 90°의 간격으로 있는 4개의 구멍위치에서 각각 수직·수평하중을 부가하였을 때 하중에 대한 변형률의 변화가 선형적으로 나타났으므로 Gauge의 부착상태나 절연상태가 적절하다고 볼 수 있었으며, 데이터 분석시 적용할 교정값은 하중과 변형율의 기울기를 산출하여 사용하였다.



Fig. 9 항자성용 Strain gauge를 부착한 측정용 윤축

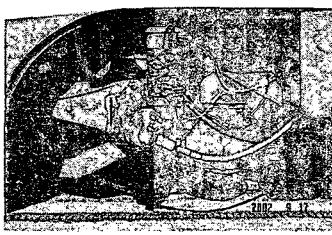


Fig. 10 시제차의 축상에 장착된 Slip Ring

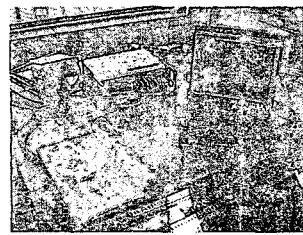


Fig. 11 실시간 계측과 저장을 위한 장비

## 5. 본선주행시험

Fig. 9와 같이 스트레인 게이지를 부착한 측정용 윤축은 에폭시로 코팅하여 편성열차의 최전부에 투입하였으며 회전체인 윤축에서 고정체인 차내로 신호를 전달하기 위한 수단으로 Fig. 10과 같은 슬립링을 이용하였고, Fig. 11은 차내의 계측장비이다. 본선주행시험은 주행중 궤도나 차량의 특성에 의한 영향이 보다 크게 발생하는 Leading축 주행시에만 데이터를 측정하고 분석하였는데, Fig. 12는 빈도누적확률로 분석한 탈선계수 허용한도이며, Fig. 13은 정적인 윤중을 8.47톤으로 분석한 윤중감소율 허용한도이다. 탈선과 궤간확대의 한도를 기준으로 횡압허용한도를 분석하였으며, Fig. 14는 주행거리에 따른 측정데이터이고 Fig. 15의 속도별 탈선계수에서 224km/h 이후의 데이터는 Polynomial Regression과 Gaussian Fitting하여 결과를 나타내었는데, 다항회귀 피팅에서 차수를 3으로 주면 340km/h 이상에서는 탈선계수가 0.8을 넘어가는 것을 볼 수 있으며, 가우시안과 로렌치안 비선형 피팅에서는 350km/h 이상에서도 0.8 미만일 것으로 추정되고 있다.

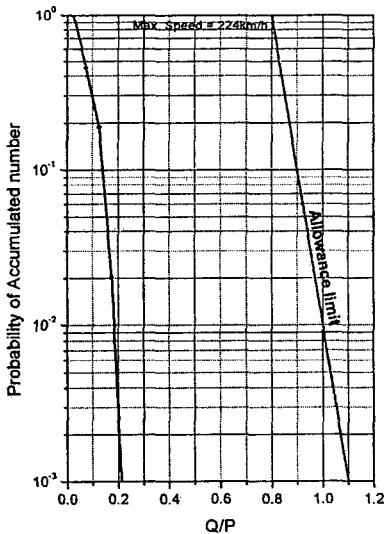


Fig. 12 탈선계수 허용한도

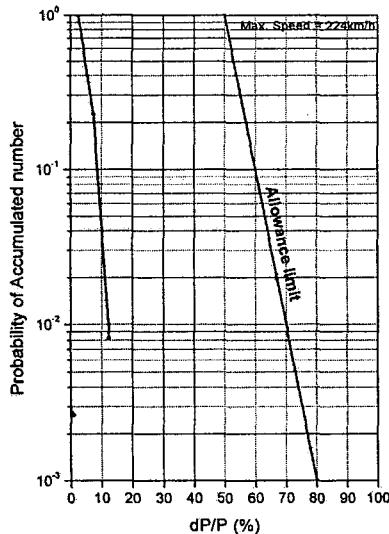


Fig. 13 윤중감소율 허용한도

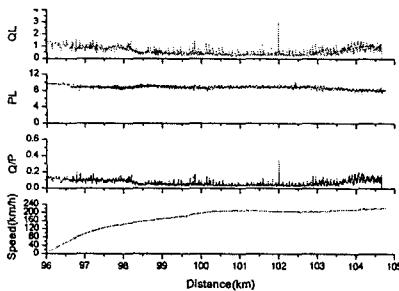


Fig. 14 이동거리에 따른 데이터

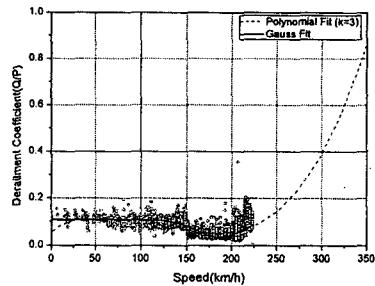


Fig. 15 속도와 탈선 계수

## 6. 결론

최고속도 224km/h까지의 주행시험에서 주행안전성 측정결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 전체적으로 볼 때 차량의 주행안전성은 확보된 것으로 판단된다.
- 2) 속도와 탈선계수는 비례하지 않았으며 150km/h에서 탈선계수가 감소하는 것은 외궤측인 좌측 차륜이 곡선선로에 접어들면서 외궤측의 수직하중이 증가하였기 때문이다.
- 3) 340km/h 이상 주행할 때에는 탈선계수 0.8을 초과할 수도 있지만, 224km/h까지의 선형피팅결과만으로는 신뢰성이 부족하며, 실제로 주행안전성을 평가할 때는 탈선계수가 분포하는 빈도를 누적확률로 계산하거나, 0.5m 간격으로 2m씩 Sliding Mean 방법으로 통계처리하기 때문에 350km/h에서도 안전할 것으로 판단된다.
- 4) 주행속도 224km/h까지의 탈선계수를 빈도누적확률로 평가할 때 충분히 안전하였다.
- 5) 운중감소율은 50% 미만을 안전한도로 설정하고 있는데, 주행중 운중감소율은 12.5% 미만으로 나타났다.
- 6) 횡압은 Q/P의 한도와 궤간확대의 한도로 볼 때 매우 안전하였다.

## 참고문헌

1. 함영삼 외, "한국형 Swing Motion Bogie 개발을 위한 적용방안 연구", 한국철도기술연구원 보고서, 2002
2. 함영삼 외, "기존 철도차량의 운용하중이력 분석", 한국철도기술연구원 보고서, 1998
3. 철도기술연구소, "철도차량의 주행안전성 평가방법", 철도기술연구보 VOL23 NO1, pp. 198~204, 1989.
4. 함영삼 외, "화물수송용 철도차량 현가장치의 설계변수와 진동성능에 관한 연구", 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 B, pp. 507~512, 2001.6
5. 전웅식 외, "한국형 고속철도차량의 차륜/궤도 작용력 측정을 위한 윤축의 구조강도 해석 및 정하중시험", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 898~903, 2002. 10
6. 日本機械學會編, "鐵道車輛のグイナミクス", (株)電氣車研究會, 1996
7. 鐵道總合技術研究所, "鐵道のための 試験法・計測法", pp. 74~81, 昭和 5年
8. 鐵道總合技術研究所, "在來鐵道運轉速度向上 試験 マニュアル解説", pp. 67~94, 平成 5年