

◆ 특집 ◆ 철도차량의 주행안정성 향상 기술

3-축 대차 곡형평판차량의 주행안전성 평가

Evaluation of Running Safety for Depressed Center Flat Car of 3-axle Bogie

함영삼<sup>1,✉</sup>, 서정원<sup>1</sup>, 권석진<sup>1</sup>, 이동형<sup>1</sup>  
 Young Sam Ham<sup>1,✉</sup>, Jung Won Seo<sup>1</sup>, Seok Jin Kwon<sup>1</sup> and Dong Hyung Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 (Vehicle and Track Research Department, Korea Railroad Research Institute)

✉ Corresponding author: ysham@krii.re.kr, Tel: 031-460-5202

Manuscript received: 2011.3.19 / Revised: 2011.3.28 / Accepted: 2011.4.1

*For the safety of railway, it should be evaluated for the running safety by measuring the derailment coefficient. Although railway has run the fixed and maintained rail, some of railway is derailed. This report shows the results that performed the static load test, main line running test on the basis of the derailment theory and experience. It is executed main line test into more than 90km/h for estimating the curving performance and running safety of depressed center flat car of 3-axle bogie. As the test results, could confirm the curving performance and running safety of depressed center flat car of 3-axle bogie from the results of the wheel unloading, lateral force, derailment coefficient etc. Derailment coefficient was less than 0.6, and lateral force allowance limit and wheel load reduction ratio were enough safe.*

Key Words: Derailment Coefficient (탈선계수), Wheel Load (윤중), Lateral Force (횡압), Running Safety (주행안전성), Wheel Unloading Ratio (윤중감소율)

기호설명

- P = Wheel Load (Vertical Force, ton)
- PR = Wheel Load of Right Wheel (ton)
- PL = Wheel Load of Left Wheel (ton)
- Q = Lateral Force (ton)
- QR = Lateral Force of Right Wheel (ton)
- QL = Lateral Force of Left Wheel (ton)
- dP = Reduction Value in Wheel Load (ton)

1. 서론

철도는 대량 운송 수단으로써 안전성, 정시성이 뛰어난 교통수단이며 이러한 장점은 시스템의 시험평가로부터 얻어진 신뢰성의 결과이다. 철도

시스템은 차량, 신호, 통신, 선로구축물, 운영 등 다양한 하부시스템으로 구성되며, 이를 구성하는 부품, 조립품, 하부시스템, 전체시스템에 대한 시험평가는 필수적이다. 철도차량의 주행안전성을 평가하는 중요한 항목은 차륜과 레일 사이의 작용력(탈선계수)이라 할 수 있다.<sup>1</sup> 이는 탈선이 철도차량의 주행안전성을 저해하는 중요한 요인으로서 대형사고로 직결되기 때문이다. 특히 새로이 개발, 제작되어 영업운행에 투입되는 차량에 있어서 곡선추종성과 주행안전성의 측정과 평가는 안전을 위한 필수적인 과정이며 주행안전성의 확보 측면에서 탈선계수의 측정은 다른 어떤 항목보다 중요하다고 할 수 있다. 또한 주행시 열차하중(윤중, 횡압)의 증가로 궤도를 구성하는 레일과 침목 등의 궤도부재가 손상되거나 파괴되기

도 하고 궤도틀림이 급격히 성장할 가능성이 높  
아지므로 주행안전성과 더불어 궤도의 유지보수  
측면에서도 차륜과 레일 사이의 작용력을 확인하  
여야 한다.<sup>2</sup> 이에 본 연구에서는 새로이 제작된  
3-축 대차 곡형평판차량의 차륜/레일 작용력 측정  
을 위한 측정용 윤축의 하중 시험, 본선주행시험  
을 통한 탈선계수, 윤증감소율, 횡압허용한도 등  
의 분석결과로부터 곡선추종성과 주행안전성을  
평가한 결과에 대하여 기술하고자 한다. 3-축 대  
차 곡형평판차량이란 Fig. 1 과 같이 1 대차에 윤  
축을 3 개씩 투입하고, 중량물 화물을 운반하기  
위하여 차체 중앙의 바닥을 Fig. 2 와 같이 낮춘  
화차이다.

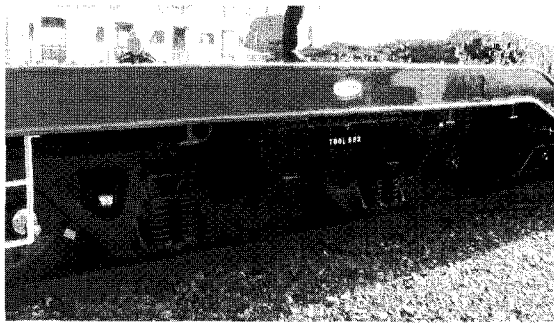


Fig. 1 3-axle bogie



Fig. 2 Depressed center flat car

## 2. 측정용 윤축의 하중시험

측정용 윤축은 차량의 최전부에 조립되어, 주  
행시 윤증과 횡압을 동시에 측정하기 위한 시험용  
윤축으로서 측정용 윤축의 제작은 주행안전성 측  
정시스템 구축의 첫 번째이자 가장 중요한 단계라  
할 수 있다. 횡압은 차륜면에서 바로 측정이 가능  
하지만, 윤증은 차륜의 절단면에서 측정하는 것이

더 정확하다. 따라서 차륜면에 구멍을 가공하여  
그 단면에서 윤증을 측정하는 것이 일반적으로 널  
리 사용되고 있는 측정방법이다. 윤증의 측정위치  
는 횡압의 간섭이 최소이면서 수직압이 크게 발생  
하여야 하므로 가공되는 구멍의 위치가 이 위치를  
포함하도록 하여야 한다. 이를 위해 윤축의 유한  
요소해석을 실시하여 그 위치를 결정하였다.<sup>3</sup> 이번  
시험에 사용한 윤축은 기존에 탈선계수 측정용 윤  
축으로 제작하였던 것을 교정하여 사용하였다. 교  
정을 위하여 시험실에서 윤축을 회전시키면서 수  
평방향 하중시험을 실시하였다. 수직방향 하중시  
험은 차량의 자중을 측정하여 평탄직선 선로에서  
저속으로 차량을 주행시키면 레일과 플랜지가 접  
촉하지 않으므로 수평방향 하중이 전혀 검출되지  
않는다는 원리를 활용하여 교정하였다. 삼랑진역  
에서 저속으로 주행하면서 실시한 수직하중 시험  
결과는 Table 1 과 같고, 교정설비를 이용한 횡압교  
정결과는 Table 2 와 같다.

Table 1 Calibration result of wheel load

Running	PR		PL	
	PR	QR	PL	QL
+ Peak	276.82	35.84	240.39	25.02
- Peak	-410.32	-81.10	-422.27	-70.47
mV/tare load	687.14	116.94	662.66	95.49
mV/ton	170.51	29.02	159.68	23.01

(unit : mV/ton)

Table 2 Calibration result of lateral force

Angle (°)	QR		QL	
	PR	QR	PL	QL
0	-5.24	-63.12	-2.75	-83.48
45	-0.92	89.84	4.24	86.63
90	-3.65	203.44	-2.86	208.32
135	-4.19	197.06	-3.69	204.12
180	-0.84	76.74	2.9	83.02
225	-4.6	-82.82	-1.73	-86.96
270	-0.51	-184.83	2.02	-205.67
315	-1.06	-174.29	-0.78	-206.43
Peak to Peak	4.728	388.27	7.93	414.75

(unit : mV/ton)

### 3. 평가기준

#### 3.1 탈선계수

차량이 주행할 때 레일과 차륜은 차량의 하중 외에 주행시의 복잡한 운동으로, 차륜은 레일에 수직방향의 힘과 수평방향의 힘을 작용시킨다.<sup>4</sup> 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 안전기준은 빈도누적확률로 나타내어 100%일 때 0.8, 0.1%일 때 1.1 이하이다.

#### 3.2 윤중감소율

차량의 진동이나 중심의 편기, 궤도 및 차량의 평면성 틀림, 곡선에서의 캔트 및 원심력, 풍압 등에 의해 윤중의 감소가 발생한다. 이때 윤중 감소치(dP)에 대한 정적인 윤중(P)의 비를 윤중감소비라 하며 이 값이 허용한도를 초과하면 탈선의 위험이 있다. 정적인 윤중감소의 기준은  $dP/P \leq 0.6$ 로서 곡선이나 캔트에서 발생하기 때문에 본 연구에서는 생략하고, 실제 선로에서 파악할 수 있는 조건의 동적 윤중감소 기준으로서 빈도누적확률로 100%일 때 0.6, 0.1%일 때 0.8 이하로 적용하였다.

#### 3.3 횡압

정적윤중이 차량의 자중만큼만 검출된다면 횡압은 '0'이라고 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 UIC 518 에 근거한 철도차량 안전기준에 관한 규칙을 적용하여 1 축당 횡압은  $\{(축중/3 + 10) \times 0.85\}$  를 허용한도로 설정하였다.<sup>5</sup>

### 4. 주행안전성 시험

#### 4.1 시험준비

주행안전성을 평가하기 위한 탈선계수를 측정하려면 윤측으로부터 발생하는 신호를 차량 내에서 확인하고 저장하여야 한다. 회전체 윤측에서 고정체 차체로 신호를 전달해 주는 장치로서 슬립링(Slip Ring)을 이용하였다. 엔드캡을 고정하는 차축 끝단의 엔드캡 볼트를 개조하여 Fig. 3 과 같이 슬립링을 설치하였다.

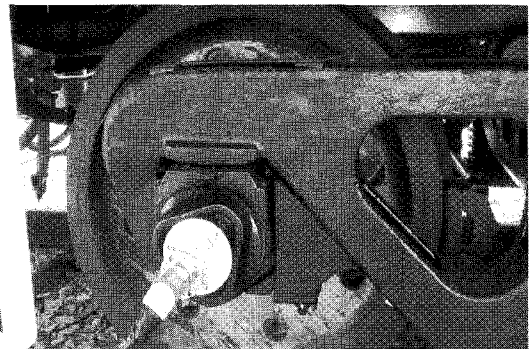


Fig. 3 Installation of slip ring

아울러 속도와 거리를 연산하기 위하여 확산반사형 코드인출타입의 광전센서를 설치하여 회전펄스를 검지하도록 하였다. 이 회전펄스는 차륜의 1 회전 간격을 정확히 찾아내야 하므로 반드시 측정용 윤측에 설치하여야만 한다. 편성된 곡형 평판차 3 량중 최전부 차량의 전부대차의 앞쪽에 조립된 측정용 윤측의 좌우 축상 끝단에 슬립링을 설치하고, 무궁화객차 내부에는 신호 중계를 위한 브릿지 박스(Bridge Box), 신호제어를 위한 앰프(Dynamic Strain Amplifier), 데이터 저장을 위한 레코더(Data Recorder), 계측시스템 제어와 모니터링용 노트북, 속도를 처리하고 표시하는 인디게이터(Digital Panel Meter) 등 계측시스템을 구축하였다. 시험열차의 편성은 Fig. 4 와 같이 하여 최전부에 기관차, 무궁화객차, 곡형 평판차량 3 량 등의 순서로 편성하였다. 무궁화객차는 시험장비 탑재와 시험요원 탑승을 위하여 별도로 연결한 것이며, Fig. 5 는 차량 내부의 계측시스템이다.

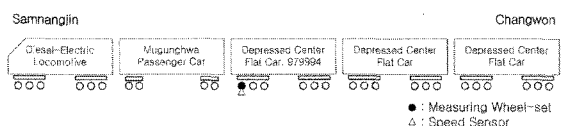


Fig. 4 Formation of test train

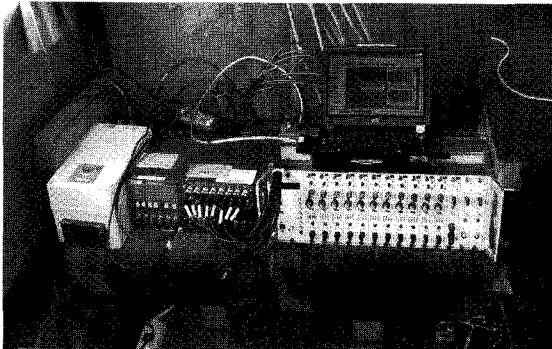


Fig. 5 Measuring system of car inside

### 4.2 본선주행시험

본선주행시험을 실시한 시험구간은 화물열차가 실제로 운행하는 선로로서 직선과 곡선이 불규칙적으로 혼재된 영업선로구간이며, 시험조건은 다음과 같다.

- 시험일자 : 2010. 12. 3
- 시험대상차량 : 곡형 평판차 979994 호
- 시험구간
  - 경전선 창원 - 삼랑진
  - 경부하행선 삼랑진 - 부산
  - 경부상행선 부산 - 동대구
- 시험항목
  - 탈선계수
  - 윤증감소율
  - 횡압허용한도

탈선계수 측정용 윤측은 편성열차의 앞쪽에 위치할 때 전위 축(Leading axle)이 되며 반대방향으로 진행할 때에는 후위 축(Trailing axle)이 된다. 본 시험에서는 경전선과 경부선 하행 운행조건은 전위 축이며, 경부선 상행 운행조건은 후위 축이 되었으므로 각각의 경우를 분리하여 3 가지 조건으로 분석하였다. 분석결과, 경부 하행선이 가장 열악한 경우인 것으로 나타났기에 본 논문에서는 경부 하행선의 시험결과를 중점적으로 게재하였다. 상·하행선을 비교하여 이동거리에 따른 측정결과를 Fig. 6 과 Fig. 7 에 나타내었으며, Fig. 8 은 궤간 확대에 대한 횡압허용한도를 분석한 결과이며, Fig. 9 는 빈도누적확률로 나타낸 탈선계수 분석결과이다. Fig. 10 의 윤증감소율을 계산할 때 정적인 윤증의 기준은 PL=4.15 톤, PR=4.03 톤으로 하였다.

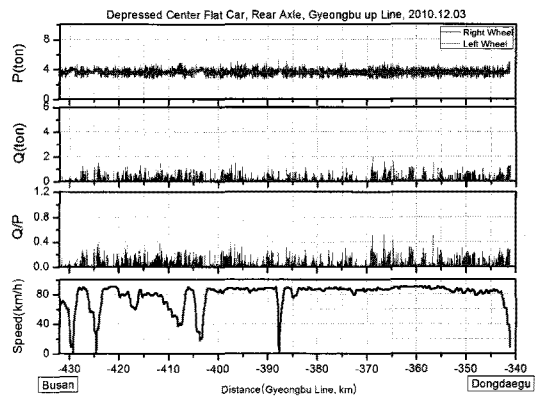


Fig. 6 Test results of up line running distance

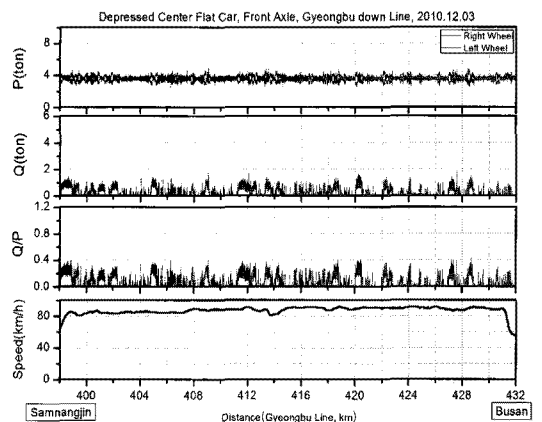


Fig. 7 Test results of down line running distance

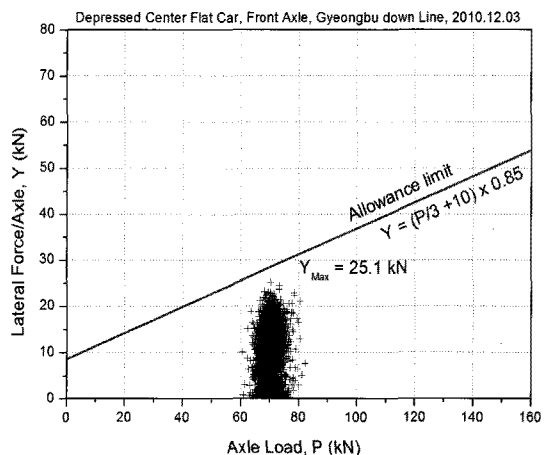


Fig. 8 Test results of lateral force

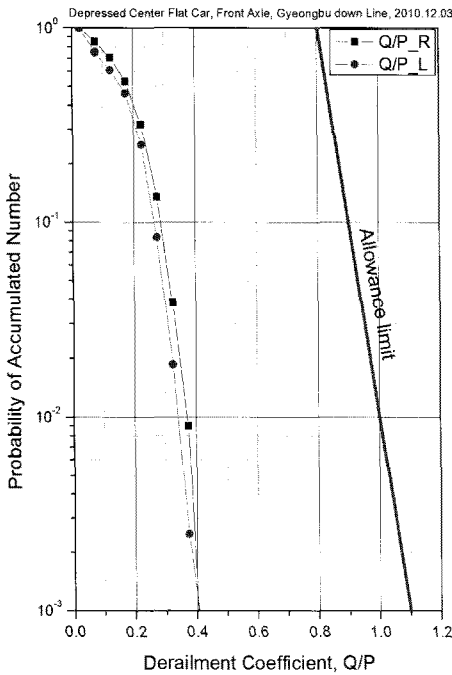


Fig. 9 Test results of derailment coefficient

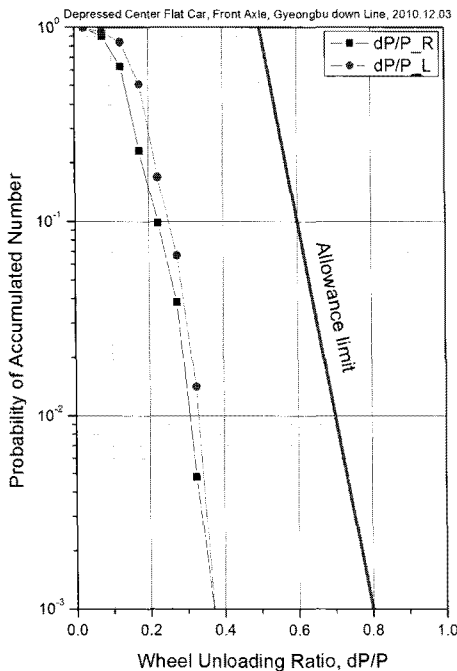


Fig. 10 Test results of wheel unloading ratio

최고속도 90 km/h 까지의 본선주행시험결과를 통하여 3-축 대차 곡형 평판차의 주행안전성을 살펴보면 전체적으로 양호한 것으로 나타났으며, 세부 항목별 분석결과는 다음과 같다.

1) 탈선계수

- 탈선에 대한 안전성을 판단할 때 가장 기본적인 지표로 사용하는 탈선계수는 빈도누적확률이 0.1% 일 때에 0.5 미만이었고, 최대값의 경우에도 0.6 미만으로서 허용한도 이내였다.

- 경전선과 경부 상행선에서는 여객열차 대피와 제동시험 등으로 시험열차가 정지하는 경우가 있었으므로 50 km/h 미만의 속도대역은 분석대상에서 제외하였다. 이는 정상운행조건이 아닌 경우로서 분기기(포인트부, 리드부, 크로스부 등)를 통과할 때와 비상제동시험 등의 운행조건에서는 별도로 취급하여야 한다.

2) 윤증감소율

- 동적인 윤증감소에 대한 윤증감소율은 0.1% 확률에서 0.8 까지 허용하고 있는데, 대상차량의 시험결과는 0.4 미만으로서 허용한도 이내였다.

- 동적윤증감소라는 것은 차량 가감속시의 진동과 충격 등에 의해 발생하는 비교적 단시간의 윤증감소를 말한다. 정적인 윤증감소는 완화곡선에서의 궤도평면틀림, 차량적재물의 편적, 곡선에서의 부적절한 캔트 등으로 발생하는 것으로서 본 시험에서의 제한적인 선로운행조건과 만차조건보다 열악한 공차조건만에서의 주행안전성시험으로 인하여 정적인 윤증감소량은 분석대상에서 제외하였다.

- 짧은 시간의 윤증감소에서는 윤증감소율이 목표값을 넘었더라도 윤증의 측정파형 및 윤증감소가 발생한 차륜의 축상 상하진동가속도의 측정파형으로 판단하여, 윤증감소율이 목표값을 초과하는 시간이 매우 짧을 때에는 안전에 지장이 없다고 판단할 수도 있다.

3) 횡압허용한도

- 횡압은 모든 구간에서 26 kN 미만으로 허용한도 이내였다.

- 궤간확대한계와 곡선통과성능을 판단하기 위한 횡압허용한도는 궤도설비가 열악한 조건에서는 타이플레이트(tie plate)가 있을 때 침목고정못에 작용하는 압력이 항복점에 도달하는 경우를 적용하

5. 결론

기도 하는데, 이번 본선주행시험 선로는 종전에 비하여 성능이 향상된 체결구를 적용하고 있으므로 UIC 518 에 근거한 철도차량 안전기준에 관한 규칙을 적용하였다.

## 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. 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.
3. Ham, Y. S. and Oh, T. Y., "Finite element analysis of wheel-set for derailment coefficient measurement that have plane plate shape," Proceedings of KSPE Autumn Conference, pp. 119-122, 2004.
4. Ham, Y. S., Lee, D. H., Kwon, S. J. and Seo, J. W., "The experiment study about a correlation between the derailment coefficient of the railway vehicle and the track alignment," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 27, No. 8, pp. 7-12, 2010.
5. Railroad Safety Law, "Rule about safety level of rolling stocks," Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Notification No. 35, 2008.