

## 신형 고출력 전기기관차의 곡선추종성 및 주행안전성 평가<sup>§</sup>

함 영 삼<sup>\*†</sup>

\* 한국철도기술연구원 시스템안전연구단

### Evaluation of Curving Performance and Running Safety of New High-Power Electric Locomotive

Young Sam Ham<sup>\*\*</sup>

\* Safety Research Team, Korea Railroad Research Institute

(Received December 28, 2012 ; Revised March 13, 2013 ; Accepted March 14, 2013)

**Key Words:** Curving Performance(곡선추종성), Running Safety(주행안전성), Lateral Force(횡압), Derailment Coefficient(탈선계수), Wheel Unloading Ratio(윤중감소율)

**초록:** 본 논문에서는 횡압으로 곡선추종성을 판단하였고, 주행안전성은 윤중감소율 및 윤중과 횡압의 비율인 탈선계수로 평가하였다. 고출력 신형 전기기관차의 곡선추종성 및 주행안전성 평가한 결과, 탈선계수는 시험축이 열차의 앞쪽에 위치할 때가 뒤쪽에 위치할 때보다 크게 나타났으며, 탈선계수의 최대값은 경부선 상행선에서 0.572로 나타났다. 횡압은 곡선 선로가 많은 구간에서 크게 발생하여 주행속도보다는 곡선반경에 비례하는 것으로 나타났으며, 최대 축당 횡압은 태백선에서 77.6 kN 까지 발생하였다. 윤중감소율은 영동선에서 47.6 %까지 발생하였다. 최고속도에서의 주행안전성과 최소곡선반경에서의 곡선통과성능이 요구하는 기준을 만족하였다.

**Abstract:** In this study, curve responsiveness was assessed based on the lateral force and running safety was evaluated based on the wheel unloading ratio and derailment coefficient, which is the ratio of the wheel load and the lateral force. The evaluation of the curving performance and running safety of the new high-power electric locomotive showed that the derailment coefficient appeared higher when the wheel-set was set to the front of the train instead of being placed backward, and the maximum value of the derailment coefficient was recorded as 0.572 on the Gyeongbu line. Furthermore, the lateral force increased in curved sections, and it appeared to be proportional to the curve radius. Meanwhile, a maximum axis lateral force of 77.6 kN was recorded on the Taebaek line, and the wheel unloading ratio was 47.6% on the Yeongdong line. Finally, the running safety at the maximum speed as well as the through-curve performance of the curve radius satisfied the required standards.

### 1. 서 론

철도의 기관차는 디젤기관차와 전기기관차로 크게 구분할 수 있다. 우리나라의 철도는 소음과 대기오염 등 환경문제가 이슈화되면서 전철화가 꾸준히 이루어지고 있다. 그러면서 지금까지 우리나라의 산업화를 이끌던 디젤기관차가 점차 사라지고, 견인력이 향상된 전기기관차로 대체되고

있다. 새로운 전기기관차는 지금까지 국내에 보급된 전기기관차와 비교할 때 여러 가지 면에서 변화가 이루어졌다. 견인력은 5,200에서 6,600 kW로 증가하였고, 차량의 중량도 88톤에서 132톤으로 증가하여 점착력을 향상시켰으며, 대차의 형식도 2축 3대차 타입에서 3축 2대차 타입으로 변화하였다. 철도차량의 주행안전성을 저해하는 중요한 요인은 탈선이다. 철도에 있어서 탈선은 대형사고로 직결되기 때문에 결코 쉽게 간과할 수 없는 부분이며, 철도가 타교통수단에 비해 상대적으로 장점으로 내세울 수 있는 안전성을 확보하기 위하여 반드시 차륜과 레일 사이에서 발생하

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, ysham@krri.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

는 상호 작용력을 측정하여 탈선계수를 평가하여야만 한다.<sup>(1)</sup> 또한 열차의 주행에 따른 윤중과 횡압 등 하중의 증가로 궤도를 구성하는 레일과 침목 등 궤도부재가 손상되거나 파괴되기도 하고 궤도틀림이 급격히 성장할 가능성이 생기기 때문에 궤도파괴가 발생하지 않는 범위에서 원활한 열차주행을 위하여 곡선추종성 및 주행안전성을 확인하여야 한다.<sup>(2)</sup> 곡선추종성이란 철도차량이 곡선선로를 주행할 때에 발생하는 횡압의 크기에 좌우되는 것으로, 레일과 차륜의 단면 형상, 윤중, 공격각, 곡선반경, 주행속도, 클리프력, 1차스프링의 강성, 대차와 차체간 회전저항 등 여러 가지 요인에 의해 지배된다.

본 논문에서는 국내에서 최초로 운행될 전기기관차의 곡선추종성 및 주행안전성을 철도안전법(국토해양부령 제280호, 2010.9.3, 철도차량의 안전기준에 관한 규칙 제30조, 31조 및 제32조)에 의거하여<sup>(3)</sup> 차륜과 레일 사이의 작용력을 측정하여 평가한 결과를 서술하였다.

## 2. 시험절차

### 2.1 시험방법

탈선계수, 윤중감소, 횡압 등을 측정하여 곡선추종성과 주행안전성을 평가하기 위해서는 실제 운용차량의 윤축에 스트레인 게이지를 부착한 측정용 윤축을 차량에 조립하여 실제 선로를 주행하면서 데이터를 측정하여야 한다. 그러므로 사전에 정하중시험을 통하여 윤축을 교정하여야 한다. 금번 연구에서는 편성열차의 최전부 차량 최전부축에 시험용 윤축(Measuring Wheel-set)을 장착하여 본선 주행중 차륜과 레일 사이에서 발생하는 작용력을 측정하였다.

시험대상차량인 고풍력 신형 전기기관차의 최전부 차축은 구동축으로서 드라이빙 기어(Driving Gear)를 탑재하여야 하기 때문에 차축에 브레이크 디스크를 설치하지 못하고 차륜 브레이크 디스크를 사용하도록 설계되었다. 차륜 디스크를 설치하기 위하여 차륜에 크고 작은 홈들이 뚫려져 있는 상태에서 탈선계수 측정용 센서를 부착하기 위하여 홈을 추가로 가공하게 되면 구조적인 취약부가 발생하게 되는데, 이러한 부분에 대해서는 차륜과 레일 상호 작용에 의한 접촉력이 발생할 때의 응력분포를 해석하여 하중간의 연성을 최소화하고, 최적의 게이지 부착위치를 선정

하여 안전성 검증을 실시하고 있다.<sup>(4,5)</sup> 그럼에도 불구하고 리드 와이어를 인출하기 위한 드릴가공은 안전도를 떨어뜨릴 수밖에 없기 때문에 본 연구에서는 차륜 디스크를 채택하고 있는 전기기관차의 탈선계수 측정시스템으로 무선계측시스템을 선택하였다.<sup>(6)</sup>

곡선추종성 및 주행안전성을 평가하기 위한 탈선계수 및 윤중감소량 측정은 차량의 운용상태, 주행하는 선로조건, 차량에 적재된 하중조건 등에 따라 다양하게 변화하므로 본선 시운전시 실제 선로에서 차량의 주행중에 측정하는 것을 원칙으로 하며, 횡압 및 윤중의 측정은 차륜에 스트레인 게이지를 부착하여 정비·교정한 윤축을 차량에 장착하여 측정한다.<sup>(7-9)</sup>

#### 2.1.1 열차편성 및 측정용 윤축의 위치

주행중 궤도나 차량의 특성에 의한 영향이 가장 큰 열차 진행방향의 전부(前部)축에 측정용 윤축을 취부한다.

#### 2.1.2 배선 및 측정구간

측정용 윤축에서의 스트레인 게이지 출력은 차륜 플레이트에 텔레메트리 송신기를 설치하고 차체에 안테나와 수신기를 설치하여 차량 내에서 측정하기 때문에 단락에 주의하며 유도장치가 발생하지 않도록 한다. 측정구간은 임의의 구간에서 차량과 선로의 주행특성을 조사하고자 할 때 직선, 곡선, 전철기, 교량 등의 특정한 지점을 설정하고 열차의 운전속도를 변화시켜 가면서 반복 시험을 하는 구간주행시험과, 주행안전성을 판정하고자 할 때 정규열차편성에 의한 영업운전조건으로 운행하면서 시험하는 일반주행시험으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 정상 영업운전조건에서 모든 선로의 특성이 반영될 수 있도록 다양한 선로에서 서로 다른 제한속도로 운행하면서 주행특성을 조사하였다.

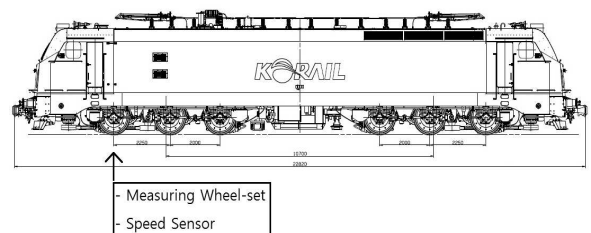


Fig. 1 Position of measuring wheel-set

2.1.3 시험결과의 기록, 저장 및 처리방법

분석 및 저장용 파일과 기록지에는 열차번호, 차량번호, 측정일시, 차량속도, 거리지점 등을 표시하여야 하며, 곡선, 구배, 교량, 전철기 등 기타 필요한 사항을 기록하여 둔다.

계측 데이터의 저장은 데이터 레코더에 일괄 저장하며 열차번호, 차량번호, 측정일시, 차량속도, 거리지점 및 곡선, 구배, 교량, 전철기 등 필요한 사항을 음성정보와 이벤트 마크 등을 이용하여 저장한다.

2.2 측정장치

2.2.1 주요 측정장치

- 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 장치로 Telemetry Transmitter, Battery Powered Transmitter Carrier, Telemetry Receiver 등으로 구성된다.
- ③ Speed Meter : 윤축 1회전당 1펄스씩 감지하여 속도와 거리를 연산
- ④ Data Recorder : 신호를 저장하는 장치
- ⑤ Note Book : 계측현장에서 신호를 모니터링하고 제어하는 역할
- ⑥ Signal Processor : 연구실에서 계측된 데이터를 재생하면서 신호를 처리

2.2.2 측정기기의 구성

측정기기는 Fig. 2와 같이 구성하며 그림에서

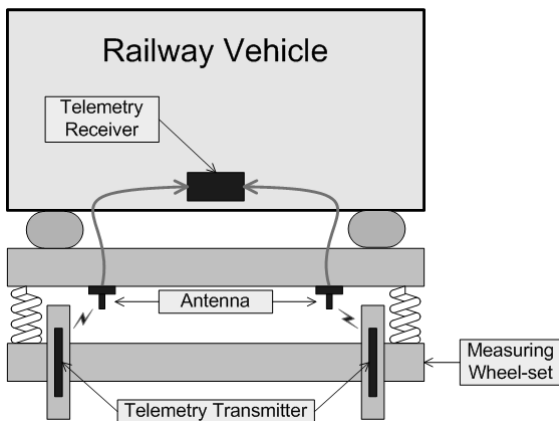


Fig. 2 Layout of measuring system

보는 바와 같이 회전체에서 고정체로의 신호전달은 텔레메트리를 사용하였고, 데이터는 데이터 레코더에 기록하여 신호처리장치로 분석한다. 이때 각 기기의 조정은 파형을 판독하기에 적절한 상태로 감도를 조정한다.

2.3 평가기준

2.3.1 탈선계수의 허용한도

측정 전구간을 차륜 1회전마다 윤중과 횡압의 최대치를 구하고 0.05 단위로 구분하여 빈도누적확률로 나타내어 기준에 적용한다. 이때 허용한도는 빈도누적확률로 나타내어 100%일 때 0.8, 0.1%일 때 1.1까지 허용하며, 최대값이 1.2를 초과하여서는 안 된다(철도차량의 안전기준에 관한 규칙 제32조).

2.3.2 윤중감소의 허용한도

공차중량상태의 정적인 윤중감소량은 동일 차축에서 양쪽 차륜 평균치의 최대 60%까지 허용된다. 동적인 윤중감소량은 측정 전구간을 차륜 1회전마다 최소윤중(Pmin)을 읽고 윤중감소비를 계산하여 10% 단위로 나누어 빈도누적확률로 나타내어 기준에 적용한다. 이때 허용한도는 빈도누적확률로 100%일 때 50%, 0.1%일 때 80% 이하를 기준으로 평가한다.

2.3.3 횡압 허용한도

횡압은 주로 곡선 통과시의 초과원심력에 의한 외궤측에서의 횡압과 차량의 좌우진동(Rolling, Yawing)에 의한 횡압으로 대별되고 보통 측정하는 횡압은 이들이 혼합된 것이다. 횡압의 허용한도는 측정 전구간에서 일정치 이상의 횡압과 일정치 이하의 윤중을 읽고 이것에 대응하는 횡압도 함께 읽어 기준에 적용한다. 이 경우에 횡압은 다음의 기준을 초과하여서는 아니된다.

$$Y = (P/3 + 10) a$$

Y : 1축 당 횡압(kN)

P : 축중(kN)

a : 동력차·객차의 경우는 1, 화차의 경우는 0.85

3. 본선주행시험

3.1 시험 개요

2012년 6월 10일부터 14일까지 전기기관차 단

독으로 경전선, 경부선, 호남선, 전라선, 충북선, 태백선, 영동선, 중앙선 등의 선로에서 최고속도 시험을 포함한 주행시험을 실시하였다. 탈선계수 측정용 윤축이 앞쪽에 위치할 때인 Leading Axle 조건과 뒤쪽으로 진행할 때인 Trailing Axle 조건으로 구분하였다. Leading Axle 조건으로 열차가 주행할 때 궤도나 차량의 특성에 의한 영향이 보다 크게 발생하였으므로, 본 연구에서는 열악한 조건일 때의 주행안전성 분석결과만 검토하였다.

3.2 시험 결과

Fig. 3~5는 주요선로의 기준거리별 윤중(V, Vertical Force), 횡압(L, Lateral Force), 탈선계수(L/V) 및 속도를 나타내며, Fig. 6은 횡압허용한도, Fig. 7은 탈선계수 허용한도, Fig. 8은 윤중감소율 허용한도를 나타내고 있다.

3.3 시험결과 고찰

3.3.1 탈선계수

탈선에 대한 안전성을 판단할 때 가장 기본적인 지표로 사용하는 탈선계수는 시험축이 열차의 앞쪽에 위치할 때가 뒤쪽에 위치할 때보다 크게 나

Table 1 Section & speed for major test track

Test track	Section	Max. Speed (km/h)
Gyeongbu line	Samnangjin-Jochiwon	131
Jeolla line	Iksan-Gwanchon	168
Yeongdong line	Baeksan-Yeongju	86
Taebaek line	Jecheon-Baeksan	90

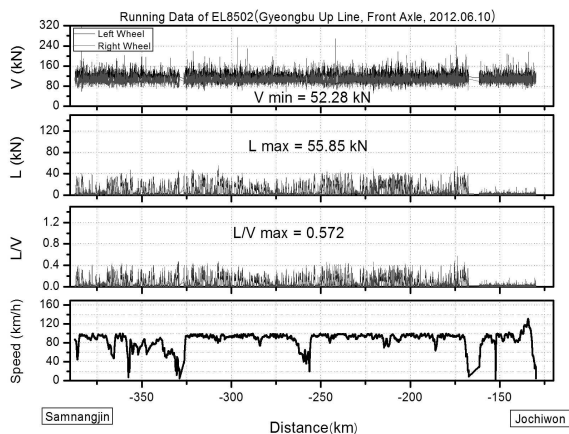


Fig. 3 Test results of Gyeongbu line

타났으며, 탈선계수의 최대값은 Fig. 3에서와 같이 시험축이 열차의 전부에 위치할 때의 경부선 상행선에서 0.572로 나타나서 철도차량의 안전기준에 관한 규칙에서 요구하는 기준을 만족하였다.

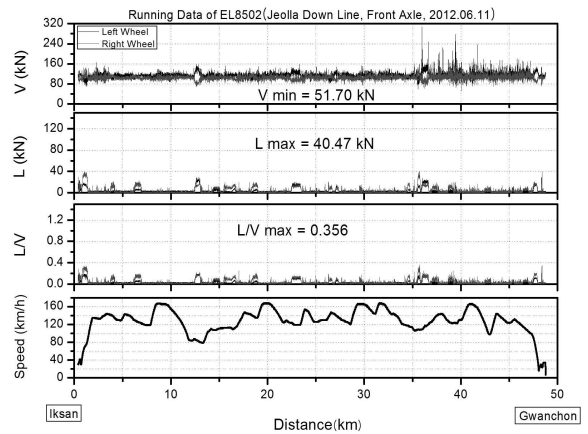


Fig. 4 Test results of Jeolla line

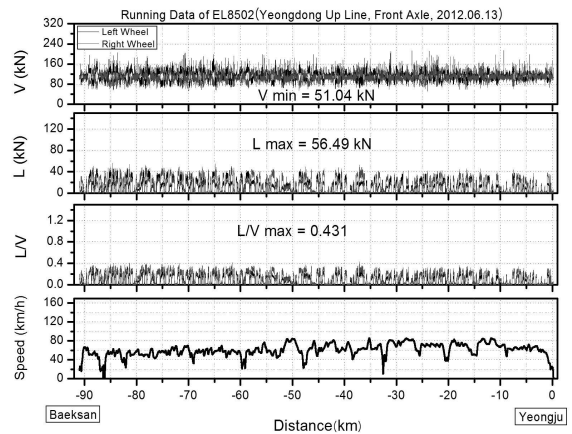


Fig. 5 Test results of Yeongdong line

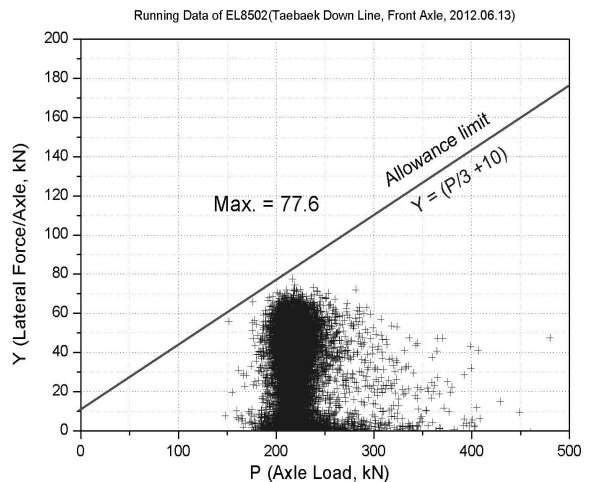


Fig. 6 Test results of lateral force

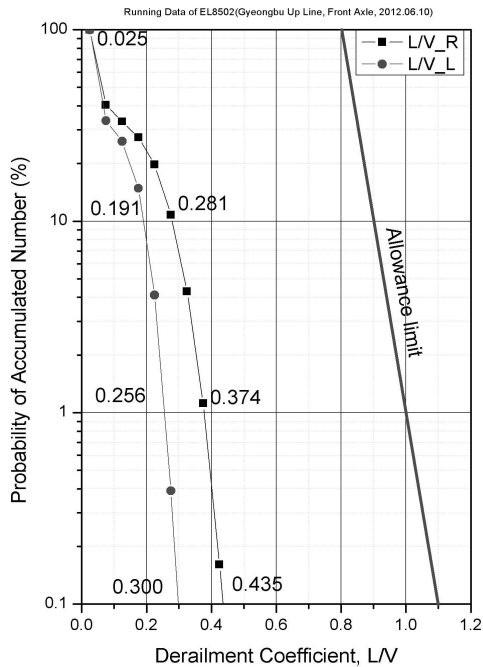


Fig. 7 Test results of derailment coefficient

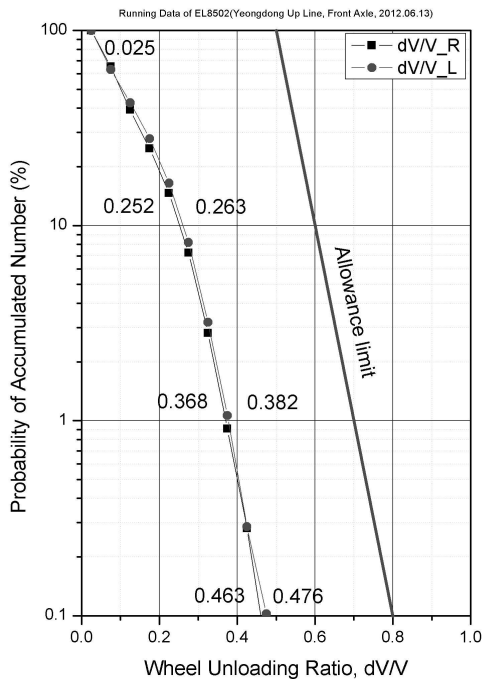


Fig. 8 Test results of wheel unloading ratio

3.3.2 횡압

좌우 차륜에서 발생하는 횡압을 합하여 축중과 비교하는 축당 횡압은 곡선 선로가 많은 구간에서 크게 발생하여 주행속도보다는 곡선반경에 비례하는 것으로 나타났으며, 최대 축당 횡압은 Fig. 6에

서와 같이 태백선 하행선에서 77.6 kN 까지 발생하였다. 공차의 정적 축중이 217.8 kN 이므로 축당 횡압 허용한도는 82.6 kN 까지이다. 따라서 궤간 확대 여부와 곡선추종성을 판단하기 위한 횡압허용한도는 요구하는 기준을 만족한다고 할 수 있다.

3.3.3 운중감소를

동적운중감소라는 것은 차량의 진동 등에 의해발생하는 비교적 단시간의 운중감소를 말한다. 이것은 완화곡선에서의 궤도평면틀림, 차량적재물의 편적, 곡선에서의 부적절한 캔트 등으로 발생하는 정적인 운중감소와는 구별되는 것으로 가감속시의 진동과 충격으로 인하여 발생한다. 짧은 시간의 운중감소에서는 운중감소율이 목표값을 넘었더라도 운중의 측정과형 및 운중감소가 발생한 차륜의 측정상하진동가속도의 측정과형으로 판단하여, 운중감소율이 목표값을 초과하는 시간이 매우 짧을 때에는 안전에 지장이 없다고 판단할 수도 있다. 본 연구에서의 운중감소율은 Fig. 8에서와 같이 영동선에서 47.6 %까지 발생하였으며, 기준을 만족하고 있다.

3.3.4 최고속도에서의 주행안전성

본선선로에서 최고속도로 주행할 수 있는 구간인 전라선 익산-관촌역 사이 직선구간에서 주행안전성을 살펴본 결과는 Fig. 4와 같이 탈선계수의 최대값은 0.356, 운중감소율은 최대 38.9 %, 차륜에 발생하는 횡압은 외궤측에서 40.47 kN, 축당 횡압은 54.4 kN까지 발생하여 최고속도 168 km/h에서도 안정적인 주행성능을 나타내었다.

3.3.5 최소곡선반경에서의 곡선통과성능

경부선을 비롯한 주요노선의 최소곡선선로를 주행할 때의 곡선통과성능을 살펴본 결과, 가장 열악한 경우는 경부선으로서 Fig. 4의 일부 구간인 서울 기점 307~308 km 부근 곡선반경 400R 구간을 90 km/h로 주행할 때였는데, 다른 노선에서는 곡선히용최고속도로 달리지 못했기 때문인 것으로 분석되었다. 탈선계수의 최대값은 0.470, 운중감소율은 최대 28.3 %, 차륜에 발생하는 횡압은 외궤측에서 55.85 kN까지 발생하여 모든 구간이 철도차량의 안전기준에 관한 규칙에서 요구하는 기준을 만족하고 있었다.

4. 결 론

국내에서 최초로 운행될 고출력 신형 전기기관

차의 곡선추종성 및 주행안전성을 철도안전법에 의거하여 평가한 결과는 다음과 같다.

(1) 전체적으로 볼 때 차량의 곡선추종성과 주행안전성은 양호한 것으로 판단된다.

(2) 기존선에서 주행속도 150 km/h까지의 탈선 계수는 최대 0.572로서 빈도누적확률로 평가하여도 충분히 안전하였으며, 최고속도 168 km/h에서의 주행안전성도 양호한 것으로 나타났다.

(3) 윤증감소율의 최대값은 50 % 미만으로서 허용한도 이내인 것으로 나타났다.

(4) 횡압은 탈선한도와 궤간확대의 허용한도로 볼 때 안전하였다.

### 참고문헌

- (1) Ham, Y. S., Lee, D. H., Kwon, S. J., You, W. H. and Oh, T. Y., 2009, "Continuous Measurement of Interaction Forces Between Wheel and Rail," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 35~39.
- (2) UIC CODE 518, 2009, "Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of View of Their Dynamic Behaviour - Safety - Track Fatigue - Running Behaviour, 4th Edition," *International Union of Railways*.
- (3) Railroad Safety Law, 2008, "Rule About Safety Level of Rolling Stocks," *Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs*, Notification No. 35.
- (4) Choi, S.-Y., Koo, J.-S. and You, W.-H., 2011, "Development of a Theoretical Wheelset Model to Predict Wheel-Climbing Derailment Behaviors Caused by Rolling Stock Collision," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 14, No. 3, pp. 203~210.
- (5) Kang, J.-s. 2012, "A Three Dimensional Wheelset Dynamic Analysis considering Wheel-rail Two Point Contact," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 15, No. 1, pp. 1~8.
- (6) Eom, B.-G., Kang, B.-B. and Lee, H.-S., 2012, "A Running Stability Test of 1/5 Scaled Bogie Using Small-Scaled Derailment Simulator," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 15, No. 1, pp. 9~16.
- (7) Sim, K.-S., Park, T.-W., Lee, J.-H. and Jeong, G.-B., 2012, "An Evaluation on Derailment according to Running Safety of Next-Generation High Speed Train (HEMU- 430X)," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 15, No. 4, pp. 343~351.
- (8) Eum, K.-Y., Bae, J.-H. and Choi, C.-Y., 2011, "Evaluation of Train Running Safety During Construction of Temporary Bridge on Existing Railway," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 14, No. 3, pp. 234~239.
- (9) Ham, Y. S., Jun, H. K., Seo, J. W., Lee, D. H. and Kwon, S. J., 2012, "New Lateral Force Measurement Method of the Wheel Plate for Railway Vehicles," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 29, No. 6, pp. 621~625.