

# 인천국제공항철도 통근형 차량의 주행안전성 평가

## Estimation of Running Safety of Electric Multiple Unit for Commute use in Incheon International Airport Railway

함영삼\* 서정원\*\* 허현무\*\*\* 권석진\*\*\*\* 이동형\*\*\*\*\*  
권성태\*\*\*\*\* 홍용기\*\*\*\*\* 박옥정\*\*\*\*\*

Ham, Young Sam Seo, Jung Won Hur, Hyun Moo Kwon, Seok Jin Lee, Dong Hyung  
Kwon, Sung Tae Hong, Yong Ki Park, Ok Jeoung

---

### ABSTRACT

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, wheelset manufacturing for test, main line running test on the basis of the derailment theory and experience. It is executed main line test into more than 110km/h for estimating the running safety of Incheon Int'l Airport EMU. As the test results, could confirm the curving performance and running safety of Incheon Int'l Airport EMU from the results of the wheel unloading, lateral force, derailment coefficient etc. Derailment coefficient was less than 0.8, and lateral force allowance limit and wheel load reduction ratio were enough safe.

---

### 1. 서론

철도의 안전은 시스템의 시험평가로부터 얻어진 신뢰성의 결과이다. 철도시스템은 차량, 전력공급, 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 있는데<sup>(1)</sup>, 이는 탈선이 철도차량의 주행안전성을 저해하는 중요한 요인으로서 대형사고로 직결되기 때문이다<sup>(2)</sup>. 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 파괴되기도 하고 궤도틀림이 급격히 성장할 가능성이 높아지므로 주행안전성과 더불어 궤도의 유지보수 측면에서도 차륜과 레일 사이의 작용력을 확인하여야 한다. 이에 본 연구에서는 새로이 제작되어 영업운행에 투입되는 인천국제공항철도의 차륜/레일 작용력 측정을 위한 측정용 윤축의 제작과 정하중 시험, 본선주행시험을 통한 탈선계수, 윤중감소율, 횡압허용한도 등의 분석결과로부터 주행안전성을 평가한 결과에 대하여 기술하고자 한다.

---

\* 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부

E-mail : ysham@krri.re.kr

TEL : (031)460-5202 FAX : (031)460-5279

\*\* ~ \*\*\*\*\* 한국철도기술연구원

## 2. 측정용 윤축

플레이트 부위가 곡면인 전동차의 차륜형상에서는 수직하중과 수평하중간에 상호간섭이 발생하게 되는데 유한요소해석을 통하여 적절한 게이지 부착위치를 결정하였으며, 수직하중을 측정하기 위한 게이지 부착공간으로 지름이 60mm인 구멍을 90°간격으로 4개를 윤축 양쪽이 좌우대칭이 되도록 가공하였다. 정확한 게이지 부착위치를 결정하기 위하여 응력집중 측정용 게이지를 이용하였다.

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. 1~2와 같이 간헐법으로 브릿지 회로를 구성하였다<sup>(3~4)</sup>. 실제로 측정용 윤축에서 윤중과 횡압의 상호간섭이 최소인 위치를 선정하기 위해 해석 결과를 토대로 선정한 위치에 응력집중 측정용 스트레인 게이지를 부착하고 정하중 시험을 실시하였으며 각각 수직하중 20ton과 수평하중 5ton을 가하여 상호간섭을 측정하였다. Fig. 3과 같이 브릿지 회로를 구성한 측정용 윤축에서 반복적인 교정시험을 통하여 수직하중과 수평하중간에 상호간섭을 보정할 수 있는 교정값을 산출하였다.

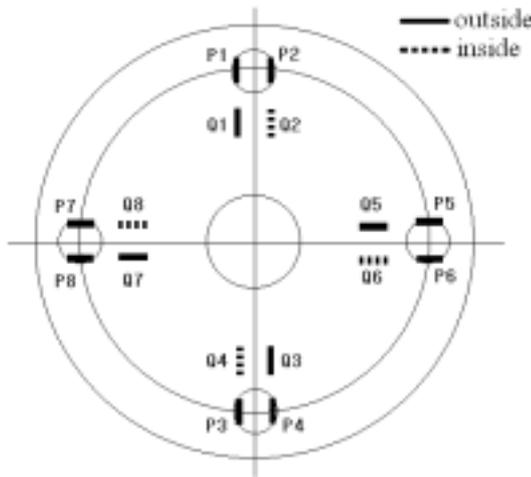


Fig. 1 The positions of strain gauge

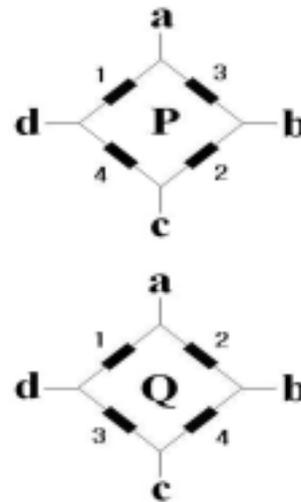


Fig. 2 Wheatston bridge connection



Fig. 3 Instrument Wheel

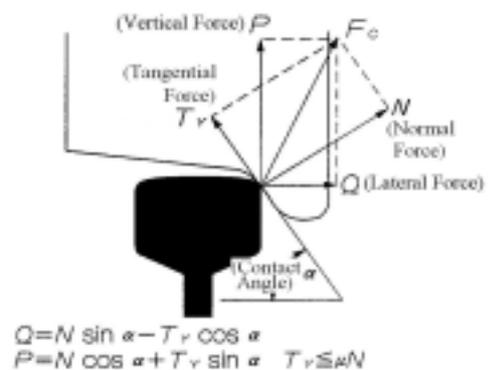


Fig. 4 Forces between wheel and rail

## 3. 시험기준

### 3.1 탈선계수(Q/P)

차량이 주행할 때 레일과 차륜은 차량의 하중 외에 주행시의 복잡한 운동으로, 차륜은 레일에 수직방

향의 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. 4와 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 윤중감소율(dP/P)

차량의 진동이나 중심의 편기, 궤도 및 차량의 평면성 틀림, 곡선에서의 캔트 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. 본선주행시험

### 4.1 시험준비

#### 4.1.1 텔레메터 설치

측정용 윤축에서 발생하는 신호를 차량 내에서 실시간으로 확인하고 저장하기 위하여는 회전체인 윤축에서 고정체인 차체로 신호를 전달해 주어야 하는데, 이 수단으로 Fig. 5와 같은 텔레메터를 이용하였다. 이를 위해 구동핀과 Front Cover를 개조한 Adapter를 제작하여 측정용 윤축의 조립 시 구동핀과 Adapter를 함께 조립하였다.



Fig. 5 Telemeter mounting on the axle box



Fig. 6 Data measurement system

#### 4.1.2 계측시스템 구축

6량 1편성의 시험열차 전부대차의 1위축에 조립된 측정용 윤축의 좌우 축상 끝단에 신호 발신기가 내장된 Telemeter를 설치하고 차량내부에는 Fig. 6과 같이 Power Supply, Distributor, Telemetry Receiver, Data Recorder, Notebook Computer 등 계측시스템을 구축하였다. 차축이 회전하면 차축 단부에 장착된 구동핀이 함께 회전하면서 Telemeter의 구동판을 회전시켜 연결된 리드선을 통해 신호가 전달된다. 이 신호는 Telemeter를 거쳐 차량내부로 전달되어 Distributor를 통해 각 채널별 신호로 분리된 다음, Telemetry Receiver를 거쳐 Recorder에 저장된다.

### 4.2 시험결과

#### 4.2.1 윤중측정

주행시험에 앞서 측정용 윤축이 설치된 차량의 윤중을 Fig. 7과 같이 측정하였는데, 8개의 차륜 위치별 윤중측정 결과는 Fig. 8과 같이 계측되어 공차의 총 중량은 32.34톤으로 나타났다.



Fig. 7 Wheel load measuring

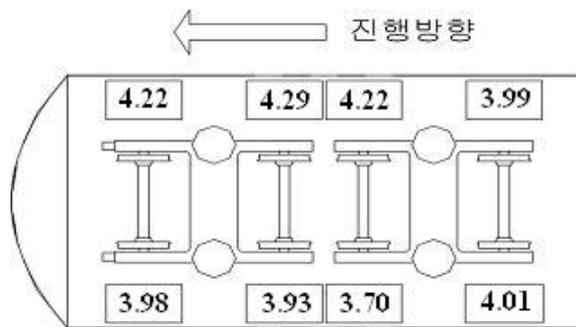


Fig. 8 Wheel load of empty car

#### 4.2.2 공차시험

Fig. 9는 측정용 윤축이 열차의 전부에 위치할 때 이동거리에 따른 측정데이터를 종합한 것이며, Fig. 10은 측정용 윤축이 열차의 후부에 위치했을 때의 데이터이다. 두 경우를 비교하여 보면 전부 위치로의 주행시가 횡압과 탈선계수가 확연히 증가하여 뚜렷이 대비되는 것을 볼 수 있다. Fig. 11은 속도별 탈선계수를 나타낸 것으로서 속도가 증가할수록 탈선계수도 비례하여 증가하지만, 곡선부를 주행할 때에 탈선계수가 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 12는 궤간확대에 대한 횡압한도를 보여주고 있다. Fig. 13의 윤중감소율을 계산할 때 정적인 윤중의 기준은 윤중측정결과를 근거로 하여 3.98톤으로 하였다. Fig. 14는 탈선계수를 빈도누적확률로 나타낸 것이다.

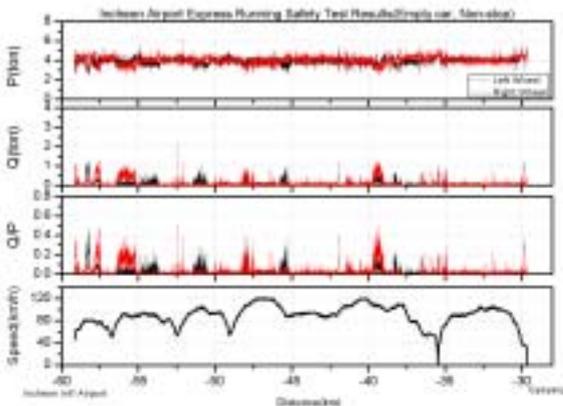


Fig. 9 Test result of empty car(front)

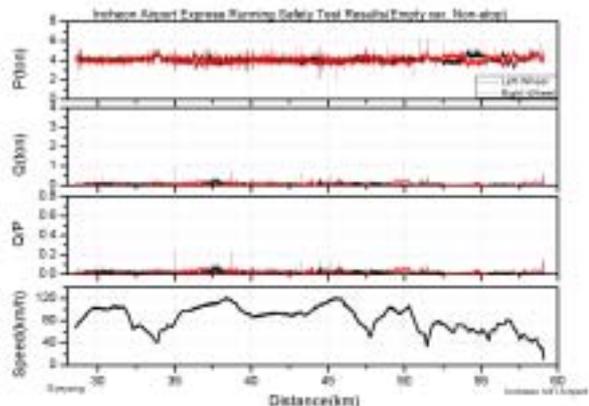


Fig. 10 Test result of empty car(rear)

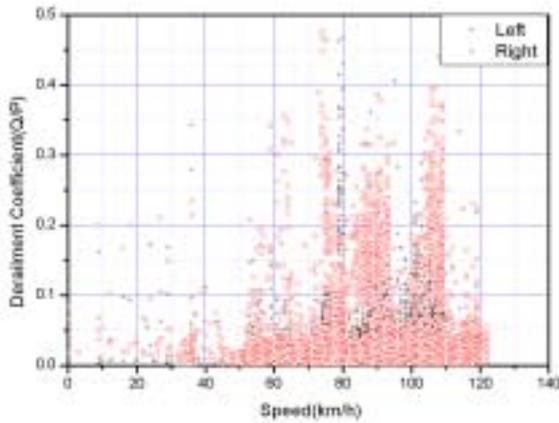


Fig. 11 Speed and derailment coefficient

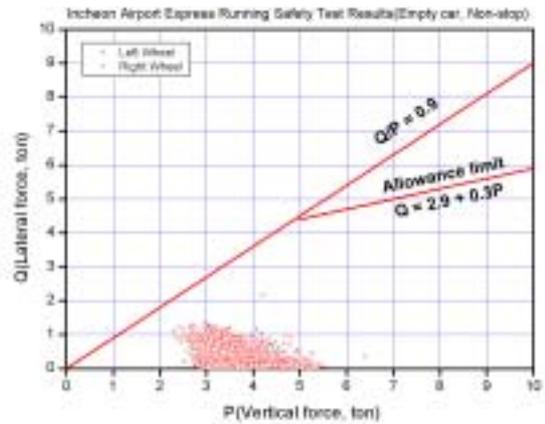


Fig. 12 Allowance limit of lateral force

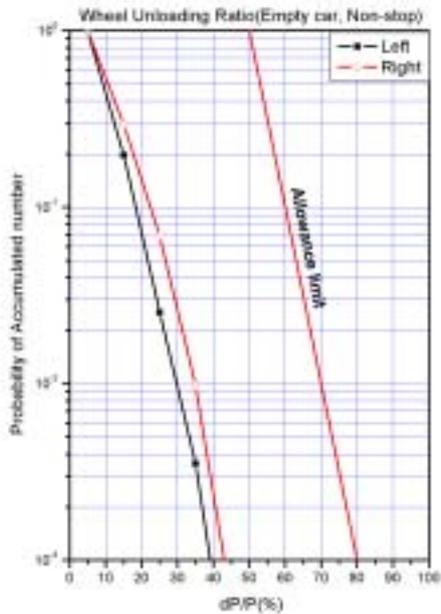


Fig. 13 Wheel unloading ratio

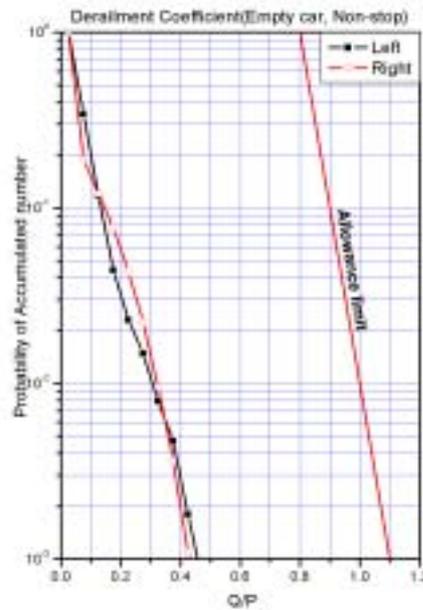


Fig. 14 Derailment coefficient

### 4.3 시험결과 고찰

#### 4.3.1 탈선계수와 횡압

탈선에 대한 안전성을 판단할 때 가장 기본적인 지표로 사용하는 탈선계수는 공차 때가 만차 때보다 높게 나타났으며, 공차와 만차 모두 0.8 미만이었다. 속도에 따른 탈선계수는 도심지에서 운행하는 전동차와는 달리 대체적으로 비례하는 것으로 나타났는데, 이것은 58 km 지점의 500 m 곡선반경과 57 km 지점의 815 m 곡선반경, 55 km 지점의 996 m 곡선반경 등을 제외하면 1500 m 이상의 곡선반경을 가지는 선형이 양호한 선로이기 때문인 것으로 판단된다.

횡압은 공차 때에는 2.2톤 미만이었으며, 만차 때에는 3톤 미만으로 발생하였다. 궤간확대와 곡선통과성능을 판단하기 위한 횡압한도는 타이플레이트가 있을 때 침목고정못에 작용하는 압력이 항복점에 도달하는 경우를 적용하였는데, 곡선반경이 도시철도보다 훨씬 큰 고속전철보다는 열악하지만 도심지를 운행하는 전동차보다는 안정적인 것을 볼 수 있었다.

#### 4.3.2 윤증감소율

동적인 윤증감소에 대한 윤증감소율은 0.1% 확률에서 0.8까지 허용하고 있는데, 동적윤증감소라는 것

은 차량의 진동 등에 의해 발생하는 비교적 단시간의 윤증감소를 말한다. 이것은 완화곡선에서의 궤도 평면틀림, 차량적재물의 편적, 곡선에서의 부적절한 캔트 등으로 발생하는 정적인 윤증감소와는 구별되는 것으로 가감속시의 진동과 충격으로 인하여 발생한다. 짧은 시간의 윤증감소에서는 윤증감소율이 목표값을 넘었더라도 윤증의 측정과형 및 윤증감소가 발생한 차륜의 측상 상하진동가속도의 측정과형으로 판단하여, 윤증감소율이 목표값을 초과하는 시간이 매우 짧을 때에는 안전에 지장이 없다고 판단할 수도 있다. 인천국제공항철도 통근형 전동차의 시험결과는 허용한도를 초과하지는 않았지만 공차 때보다 만차 때의 윤증감소율이 약간 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 실제 승객 하중보다도 많은 24톤 정도의 하중을 적재하여 최적상태의 설계조건을 초과하면서 윤증감소를 발생시킨 것으로 판단된다.

## 5. 결론

인천국제공항철도 통근형 전동차에 투입된 완성대차의 곡선추종성 및 주행안전성을 평가한 결과는 다음과 같다.

- ① 전체적으로 볼 때 차량의 곡선추종성과 주행안전성은 양호한 것으로 판단된다.
- ② 주행속도 120 km/h까지의 탈선계수를 빈도누적확률로 평가할 때 충분히 안전하였으며, 어떠한 경우에도 탈선계수는 0.8을 초과하지 않았다.
- ③ 속도와 탈선계수는 대체적으로 비례하여, 도심지에서 운행하는 80 km/h 용 전동차와는 다른 양상을 나타내었다.
- ④ 윤증감소율은 허용한도 이내로 나타났다.
- ⑤ 횡압은 Q/P의 한도와 궤간확대의 한도로 볼 때 안전하였다.

## 참고문헌

- (1) International Union of Railways, 2003, Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour-Safety-Track fatigue-Ride quality, UIC CODE 518, 2nd edition
- (2) Masayuki MIYAMOTO, 1996, Mechanism of Derailment Phenomena with Railway Vehicle, Railway Technical Research Institute REPORT, Vol. 10, No. 3, pp. 31-38
- (3) Young-Sam Ham, Jai-Sung Hong, Taek-Yul Oh, A Study on the Evaluation Methods of Running Safety for Railway Vehicle, Key Engineering Materials, Vols. 321-323(2006), pp. 1499-1502, ©2006 Trans Tech Publications, Switzerland
- (4) Korea Railway Technical Research Institute, 1989, Estimation method for running safety of railway vehicle, Korea Railway Technical Research Report, Vol. 23, No. 1, pp. 198-204