

## 인천국제공항철도 전동차의 주행안전성 평가

### The Evaluation for Running Safety of Incheon International Airport Railway EMU

홍용기† · 유원희\* · 이희성\*\*

Yong-Ki Hong · Won-Hee You · Hi-Sung Lee

**Abstract** The dynamic characteristic test result of electric rail car which is operated in Incheon International Airport Railroad is described in this paper. Express train in Incheon International Airport Railroad drives at 120km/h first in the country and derailment coefficient was measured for empty car and full-loaded car respectively. The measurement result of derailment coefficient, a key safety indicator about derailment, of empty car was higher than full-loaded car and both were lower than 0.8. The railway state wasn't good in operated section where is serviced about 80km/h and derailment coefficient also increased. Horizontal pressure was below 2.1 ton at empty car and below 2.4 ton at full-loaded car. The electric rail car in Incheon International Airport Railroad has been confirmed it's running safety at 120km/h by the measurement of derailment coefficient. But the way of assessing applied in this paper has demerits such as complication of test method, difficulty for measurement device installation and high cost. Therefore the method which is simple to measure and can certify vehicle's safety even when service driving has to be researched.

**Keywords** : Derailment, Wheel Load, Lateral Force, Evaluation

**요 지** 본 논문은 인천국제공항철도에서 운행하고 있는 전동차의 동적특성시험을 수행한 결과이다. 인천국제공항철도의 직통형 전동차는 국내 처음으로 120km/h로 주행한 차량으로 탈선계수를 공차와 만차로 구분하여 측정하였다. 탈선계수측정결과 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 80km/h를 전후한 속도 대역으로 운행하는 구간이 선로상태가 좋지 않은 구간으로서 탈선계수도 증가하는 것으로 나타났다. 횡압은 공차 때에는 2.1톤 미만이었으며, 만차 때에는 2.4톤 미만으로 발생하였다. 인천국제공항철도 전동차가 120km/h 주행에서도 안전함을 탈선계수 실측에 의해 확인하였다. 그러나 본 논문에서 적용된 평가방법의 경우 시험방법이 복잡하고, 측정장치 설치의 어려움이 있으며, 비용이 많이 드는 단점이 있었다. 따라서 측정이 간단한 방법으로 영업운전에서도 차량의 안전성을 확인할 수 있는 방안이 연구되어야 할 것이다.

**주요어** : 탈선, 윤중, 횡압, 평가

## 1. 서론

철도차량의 주행안전성을 저해하는 중요한 요인은 탈선이다. 철도에 있어서 탈선은 대형사고로 직결되기 때문에 결코

쉽게 간과할 수 없는 부분이며, 철도가 타 교통수단에 비해 상대적인 장점으로 내세울 수 있는 안전성을 확보하기 위하여 반드시 차륜과 레일 사이에서 발생하는 상호 작용력을 측정하여 탈선계수를 평가하여야만 한다.

또한 주행에 따른 열차하중의 증가로 레일과 침목 등 궤도 부재가 손상되거나 파괴되기도 하고 궤도틀림이 급격히 성장할 가능성이 생기기 때문에 궤도파괴가 발생하지 않는 범위에서 원활한 열차주행을 위하여 주행안전성을 확인하여야 한다. 특히 새로이 개발, 제작되어 영업운행에 투입되는 차량

† 책임저자 : 정회원, 서울산업대 철도전문대학원  
(한국철도기술연구원 수석연구원)

E-mail : ykhong@krii.re.kr

TEL : (031)460-5501 FAX : (031)460-5749

\* 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

\*\* 교신저자 : 정회원, 서울산업대 철도전문대학원, 교수

에 있어서 곡선추종성과 주행안전성의 측정과 평가는 안전을 위한 필수적인 과정이며 주행안전성의 확보측면에서 탈선계수의 측정은[1,2] 다른 어떤 항목보다 중요하다고 할 수 있다. 이에 본 논문은 국내 최초로 120km/h 주행한 전동차의 신규 차량에 대한 탈선계수, 횡압, 윤중감소를 등에 대한 평가를 통해 차량 주행안전성을 확인하고, 또한 철도차량 주행안전성 평가의 효율적인 방안을 모색하고자 한다.

## 2. 차량탈선 개요

### 2.1 탈선계수(Q/P)

차량이 주행할 때 레일과 차륜은 차량의 하중 외에 주행 시의 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[3,4,5] 정적해석과 동적해석으로 구별되고 Fig. 1과 같은 상태에서의 정적해석은 접촉점에서 힘의 평형을 고려하면 (1)~(3)식이 성립한다.

$$P \sin \alpha = Q \cos \alpha + \mu (P \cos \alpha + Q \sin \alpha) \quad (1)$$

$$\frac{Q}{P} = \frac{\sin \alpha - \mu \cos \alpha}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha} \quad (2)$$

$$\left(\frac{Q}{P}\right) = \frac{\tan \alpha \mp \mu}{1 \pm \mu \tan \alpha} \quad (3)$$

여기서, Q/P: 탈선계수

Q : 횡압, 수평방향의 힘

P : 윤중, 수직방향의 힘

$\Delta P$  : 윤중감소치

$\alpha$  : 플랜지 접촉각

$\mu$  : 마찰계수

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

### 2.2 윤중(P)

#### 2.2.1 정적윤중

차량의 진동에 의한 영향이 없는 경우의 윤중으로 차량의 자중에 따라 그 크기가 결정되며, 윤중의 기본적인 값은 평탄

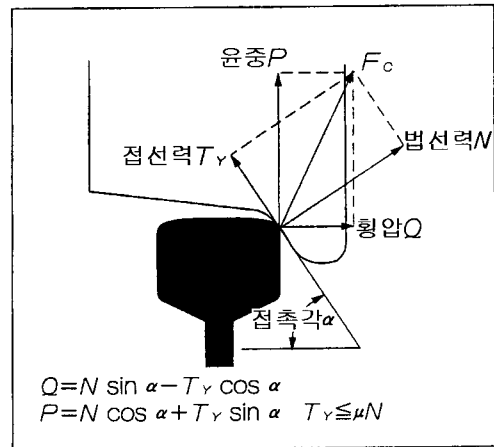


Fig. 1. Forces between wheel and rail

직선 구간을 5km/h 정도의 속도로 주행할 때의 윤중을 측정하여 수십개의 평균치를 구한 것을 사용한다. 이것은 탈선계수 측정용 윤중의 교정값을 검증할 수 있도록 정확히 구하여야 한다.

#### 2.2.2 윤중감소비( $\Delta P/P$ )

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. 동적윤중감소는 차량의 진동 등에 의해 발생하는 비교적 단시간의 윤중감소로서 완화곡선에서의 궤도평면 틀림, 차량적재물의 편적, 곡선에서의 부적절한 캔트 등으로 발생하는 정적인 윤중감소와는 구별되는 것이다.

### 2.3 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 경우에도 횡압이 윤중보다 커지게 되면 탈선의 위험성은 그만큼 높아지는 것이다.

## 3. 시험 및 평가 방법

주행안전성 평가는 실제운용차량의 윤중에 스트레인 게이지를 부착한 측정용 윤중에 차량에 조립하여 실제 선로를 주행하면서 실시한다. 측정용 윤중은 스트레인게이지를 부착하

고 휘스톤 브릿지 결선한 후, 정하중시험을 통하여 보정값을 산출하게 되면 회전체 로드셀로서의 역할을 실제 주행차량에서 담당하게 된다.

탈선계수, 윤중감소량 및 횡압 등의 측정은 차량의 운용상태, 주행하는 선로조건, 차량에 적재된 하중조건 등에 따라 다양하게 변화하므로 본선 시운전시 실제 선로에서 차량의 주행중에 측정하는 것을 원칙으로 한다.

### 3.1 측정용 윤축의 위치

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

### 3.2 측정기기의 구성

측정기기는 Fig. 2와 같이 구성하며 그림에서 보는 바와 같이 회전체에서 고정체로 신호를 전달하는 방법은 PCM Telemeter를 사용하는 방법과 Slip Ring을 사용하는 방법이 있으며, Data를 판독하는 경우도 스트레인 게이지에서 나오는 출력신호를 증폭하여 Oscillographic Recorder에 기록하고 수작업으로 적용하는 방법과 Data Recorder에 기록하여 Signal Processor로 분석하는 방법이 있다.

이때 각 기기의 조정은 신호 파형을 판독하기에 적절한 상태로 감도를 조정한다.

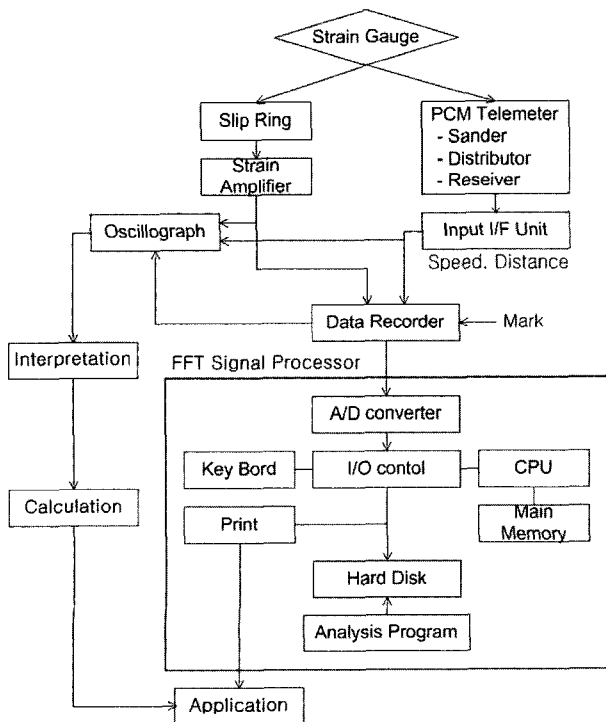


Fig. 2. Block diagram of measurement system

## 3.3 평가기준

### 3.3.1 탈선계수의 안전한도

탈선계수의 안전한도는 타오르기 탈선의 경우  $Q/P=0.9(t \geq 1/20 \text{ sec})$ 이며, 뛰어오르기 탈선의 경우  $Q/P=0.045/t(t \leq 1/20 \text{ sec})$ 이다. 여기서, t는 횡압작용시간(sec)을 나타낸다.

### 3.3.2 탈선계수의 허용한도

측정 전구간의 탈선계수를 구하여 허용한도의 기준에 적용하는 것으로 차륜 1회전마다 1개씩 Q/P의 최대치를 구하고 0.05 단위로 구분하여 빈도누적확률로 나타내어 기준에 적용한다. 빈도누적확률이 100%일 때 0.8, 0.1%일 때 1.1까지 허용한다.

### 3.3.3 윤중감소 허용한도

측정 전구간을 차륜 1회전마다 1개씩 윤중(P)을 읽고 윤중감소비를 계산하여 10% 단위로 나누고 빈도누적확률로 나타내어 기준에 적용한다. 정적 윤중감소는  $\Delta P/P \leq 0.6$ 이며, 동적 윤중감소는 빈도누적확률로 나타내어 100%일 때 0.5, 0.1%일 때 0.8까지 허용한다.

### 3.3.4 횡압 허용한도

측정 전구간에서 일정치 이상의 횡압과 일정치 이하의 윤중을 읽고 이것에 대응하는 횡압도 함께 읽어 기준에 적용한다. Q/P가 0.9를 넘지 않는 범위에서 횡압은  $Q \leq 2.9+0.3P$  이내이어야 한다.

## 4. 계측시스템

6량 1편성의 시험열차 전부대차의 1위축에 조립된 측정용 윤축의 좌우 축상 끝단에 신호 발신기가 내장된 Telemeter를 설치하고 차량내부에 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.

Fig. 3은 보정값 산출을 위한 고정시험이며, Fig. 4는 배선 고정 및 브릿지 회로구성 사진이며, Fig. 5는 축상에 장착된 Telemeter와 변위센서를 장착한 사진이다. Fig. 6은 시험차량이며, Fig. 7은 측정시스템의 사진을 나타내는 것이다. 이와 같이 탈선계수 측정은 준비에서부터 계측시스템 구성, 데이터의 보정 및 시험에 이르기까지 복잡한 과정을 거치게 된다.

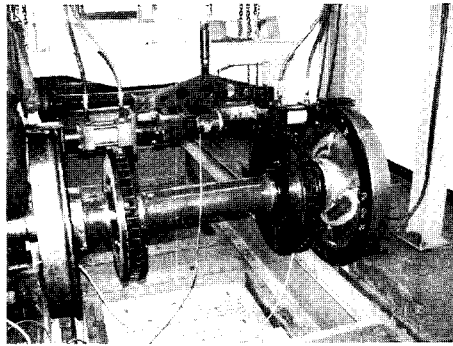


Fig. 3. Correction calculation test

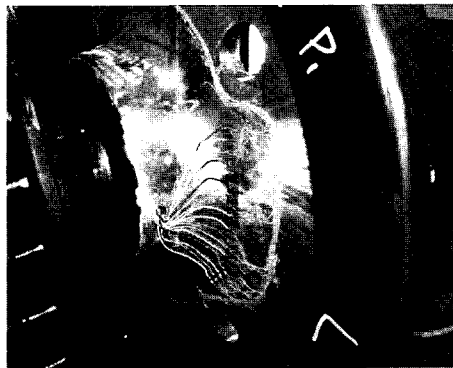


Fig. 4. Instrument wheel

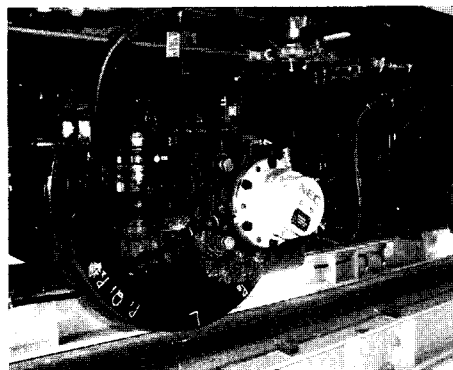


Fig. 5. Telemeter mounting on the axle box



Fig. 6. Test train

## 5. 시험결과 및 고찰

### 5.1 공차시험

2006년 11월 16일에 인천공항역에서 계양역까지 5개 역 구간을 대상으로 전부대차 1위축의 윤중과 횡압을 측정하여 탈선계수, 윤중감소율, 횡압허용한도 등을 분석하였다.

탈선계수 측정용 윤축은 TC1(제어차)의 최전부에 투입하여 인천공항역에서 김포공항역 방향으로 진행할 때 Leading축이 되며 반대방향으로 진행할 때에는 Trailing축이 되기 때문에, 주행 중 궤도나 차량의 특성에 의한 영향이 보다 크게 발생하는 Leading축 주행일 때에만 분석하였다.

주행시험에 앞서 Fig. 8과 같이 차량의 윤중을 측정하였으며, 8개의 차륜 위치별 윤중측정 결과는 Fig. 9와 같이 계속되어, 공차의 총 중량은 32.91톤으로서 일반형 차량보다 570kg 정도 더 무거운 것으로 나타났다.

직통형 차량의 주행시험은 모든 역을 정차하지 않고 통과 하면서 측정하는 것을 원칙으로 Fig. 10은 이동거리에 따른 전 구간 측정데이터를 종합하여 윤중, 횡압, 탈선계수를 나타낸 것으로 탈선계수가 0.8을 넘지 않고 있음을 보여주고 있다.

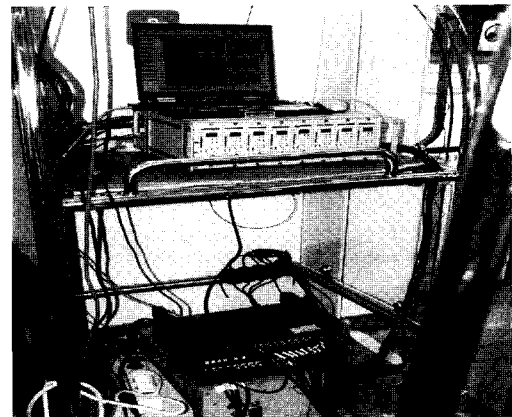


Fig. 7. Measurement system

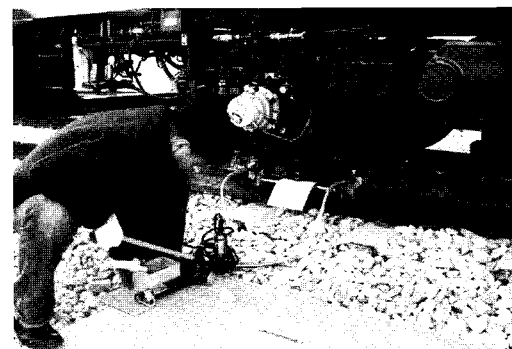


Fig. 8. Measurement of wheel force

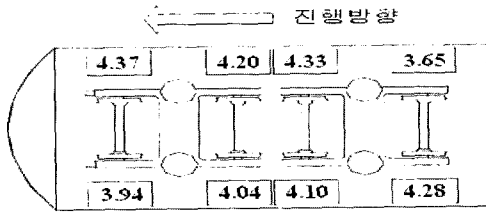


Fig. 9. Wheel load of empty car

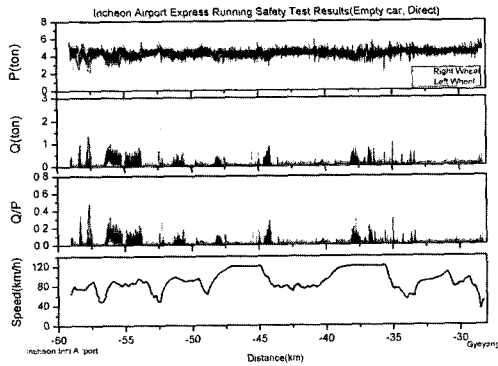


Fig. 10. Test result of empty car

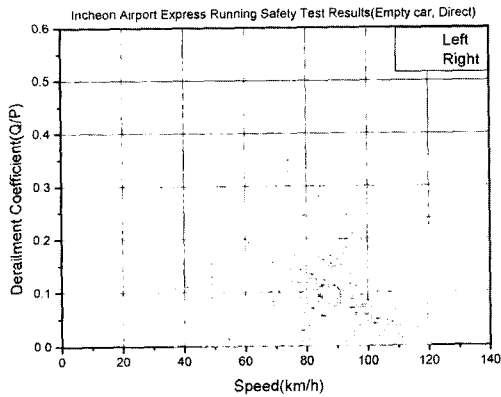


Fig. 11. Speed and derailment coefficient

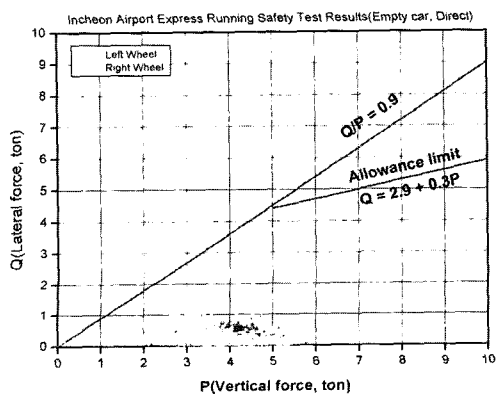


Fig. 12. Allowance limit of lateral force

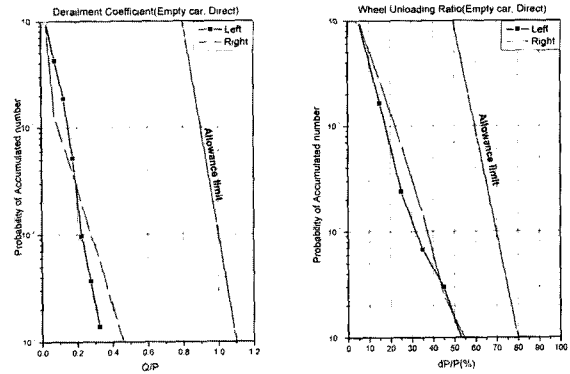


Fig. 13. Derailment coefficient Fig. 14. Wheel unloading ratio



Fig. 15. Weight load

Fig. 11은 측정된 탈선계수를 속도별로 나타낸 것으로 80~90km/h 정도의 속도에서 탈선계수가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 운행시 선로상태가 좋지 않은 곳 통과 시 나타난 것으로 예상된다. Fig. 12는 차량 주행 시 선로에 횡압한도 제한치 이상의 횡압이 작용할 때 궤간확대가 발생하는데 이번 시험에서는 횡압한도에 훨씬 미치지 못하고 있다. Fig. 13은 탈선계수에 대한 허용한도를 빈도누적확률로 나타낸 것이고, Fig. 14는 윤중감소율에 대한 허용한도를 나타낸 것으로 모두 기준치 아래로 나타나 안전함을 보여주고 있다. 정적인 윤중의 기준은 윤중측정기를 이용한 윤중측정결과와 평탄직선구간에서의 저속주행시험결과를 종합하여 Left=3.94톤, Right=4.37톤으로 하였다.

## 5.2 만차시험

시험방법과 열차편성은 공차시험과 동일하며, 열차운행구간은 김포공항역까지 하였다.

만차조건을 만들기 위하여 Fig. 15와 같이 차내에 주철 재분자를 12.75톤만큼 적재하였으며, 윤중측정 결과 만차의 총 중량은 45.66톤으로 나타났다. 이러한 중량조건은 통근형 차

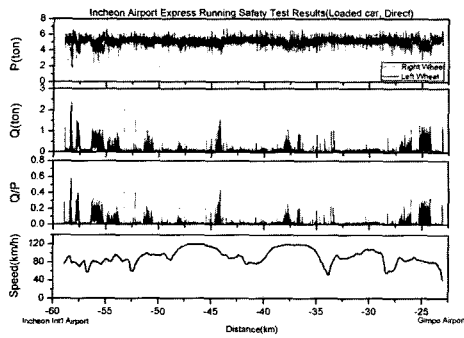


Fig. 16. Test result of loaded car

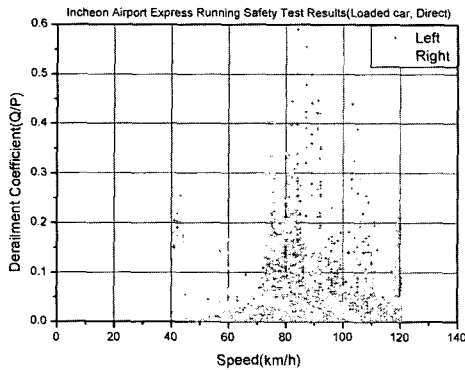


Fig. 17. Derailment coefficient by speed

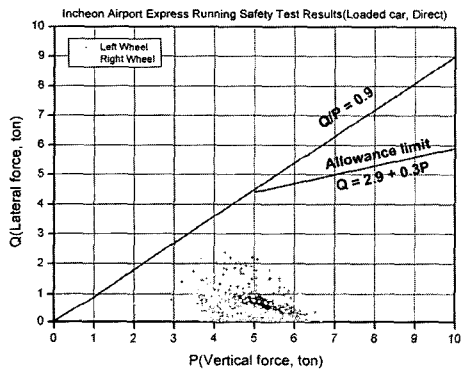


Fig. 18. Allowance limit of lateral force

량과 비교할 때, 공차 중량은 1톤 이내의 차이로서 비슷하지만 적재하중은 통근형 차량의 절반 수준으로 주행하게 되는 것이다.

직통형 차량의 만차 주행시험은 공차와 마찬가지로 모든 역을 정차하지 않고 통과하면서 측정하는 것을 원칙으로 하였다. Fig. 16은 이동거리에 따른 전구간 측정데이터를 종합하여 운중, 횡압, 탈선계수를 나타낸 것으로 탈선계수(Q/P)가 0.6을 넘지 않고 있다.

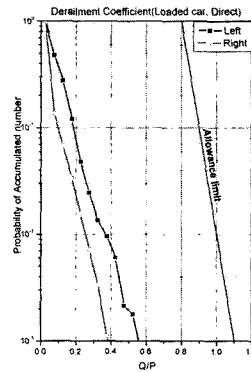


Fig. 19. Derailment coefficient

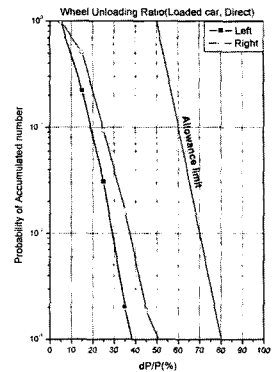


Fig. 20. Wheel load decrement

Fig. 17은 측정된 탈선계수를 속도별로 나타낸 것으로 80~90km/h 정도의 속도에서 탈선계수가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 운행시 선로상태가 좋지 않은 곳 통과 시 나타난 것으로 예상된다. Fig. 18은 차량 주행 시 선로에 횡압 한도 제한치 이상의 횡압이 작용할 때 궤간확대가 발생하는데 이번 시험에서는 횡압한도에 훨씬 미치지 못하고 있다. Fig. 19는 탈선계수에 대한 허용한도를 빈도누적확률로 나타낸 것이고, Fig. 20은 운중감소율에 대한 허용한도를 나타낸 것으로 모두 기준치 아래로 나타나 안전함을 보여주고 있다. 정적인 운중의 기준은 운중측정기를 이용한 운중측정결과와 평탄직선구간에서의 저속주행시험결과를 종합하여 Left=5.35톤, Right=5.66톤으로 하였다.

## 6. 결론

최고속도 120km/h로 주행 시험한 인천국제공항철도 신규 차량에 대한 탈선계수, 횡압, 운중감소율 등에 대한 평가를 통해 차량 주행안전성을 확인하였으며, 본선주행시험결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

### (1) 탈선계수

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 80km/h를 전후한 속도 대역으로 운행하는 구간이 선로상태가 좋지 않은 구간으로서 탈선계수도 증가하는 것으로 나타났다.

### (2) 횡압

횡압은 공차 때에는 2.1톤 미만이었으며, 만차 때에는 2.4톤 미만으로 발생하였다. 궤간확대와 곡선통과성능을 판단하기 위한 횡압한도는 타이플레이트가 있을 때 침목고

정못에 작용하는 압력이 항복점에 도달하는 경우를 적용하였는데, 곡선반경이 도시철도보다 훨씬 큰 고속전철보다는 열악하지만 도심지를 운행하는 전동차보다는 안정적인 것을 볼 수 있었다.

(3) 윤증감소율

인천국제공항철도 직통형 전동차의 시험결과는 허용한도를 초과하지 않았으며, 공차 때와 만차 때가 비슷한 수준이거나 오히려 공차 때의 윤증감소가 더 많이 발생한 것으로 나타났다. 이것은 주철제륜자를 적재하여 무게중심이 내려간 것이 요인으로 판단된다.

(4) 전체적으로 볼 때 차량의 주행안전성은 양호한 것으로 판단된다. 그러나 본 논문에서 적용된 평가방법의 경우 시험방법이 복잡하고, 측정장치 설치의 어려움이 있으며, 비용이 많이 드는 단점으로 인해 신규차량에 대해서만 주행안전성 평가가 수행되고 영업운전시에는 평가가 어려운 현실이다. 추후 새로운 시험방법에 대한 연구를 통해 간단한 방법으로도 영업운전에서도 차량의 안전성을 확보하기 위

하여 주행안전성 평가가 이루어지도록 하여야 할 것이다.

### 참고문헌

1. 철도기술연구소, 철도차량의 주행안전성 평가방법, 철도기술연구보 VOL.23 NO.1, pp.198~204, 1989.
2. UIC CODE 518, 2nd edition, April 2003, Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Ride quality, International Union of Railways.
3. 鐵道技術研究資料別冊 第1集, 鐵道のための試驗法・計測法, 輪軸の負荷および應力の測定法, 研友社, pp.1~4, 1971.6.25.
4. 鐵道技術研究資料別冊 第3集, 鐵道のための試驗法・計測法, 橫壓(Q)・輪重(P)測定用輪軸の整備と校正, pp.74~81, 1976.11.25, 研友社.
5. 小野純朗著, 鐵道のスピードアップ, 走行の安全および安定性の向上, 社團法人 日本鐵道運轉協會, pp.63~93, 1986.12.

(2007년 7월 24일 논문접수, 2007년 10월 1일 심사완료)