

한국형 고속열차의 주행저항식 예측
A Prediction of the Equation of Resistance to Motion
for Korean High-speed Train

권혁빈* 김석원** 김영국** 박춘수**
Kwon, Hyeok-bin Kim, Seog-won Kim, Young-guk Park, Chool-soo

ABSTRACT

The equation of Resistance to motion of the Korean high-speed train has been calculated and evaluated using train speed measurements gathered from coasting tests in the speed range from 30km/h to 300km/h and wind tunnel test of 1/25th scale model. The factors of resistance to motion have been decomposed into various coefficients which compose the coefficients of Davis equation referring the general resistance to motion equation of KTX train. The coefficients of Korean high-speed train has been calculated using the measurements of coasting tests and the results of wind tunnel test has been implemented to consider the minor shape modification after the coasting tests.

1. 서론

철도차량의 주행저항식은 주행시물레이션을 위해서 입력되는 가장 기본적인 자료이며, 특히 고속열차에서는 점착계수와 함께 열차의 최고속도를 결정하는 요소이다. 열차의 주행저항식은 타행시험을 통한 주행속도와 차량에 가해지는 가속도의 상관관계를 분석함으로써 정확한 측정이 가능하지만, 차량의 설계 단계에서는 타행시험을 통한 측정이 불가능하기 때문에 여러 자료를 종합한 예측에 의존할 수 밖에 없다. 특히 열차의 편성 차량 수를 고려한 일반 주행저항식은 각각의 편성에 따른 타행시험이 수행되지 않는 한 정확한 측정이 불가능하다.

본 연구에서는 호남선에 투입될 예정으로 (주)로템에서 개발하고 있는 KTX-II 열차의 일반 주행저항식을 예측하고, 이를 통하여 10량 편성으로 예정되어 있는 기본편성에 대하여 주행저항식을 예측하였다. 이를 위하여 KTX-II 열차의 원형인 G7열차에 대해 수행된 풍동시험과 타행시험의 결과들을 활용하였고, 이를 토대로 합리적인 가정을 통하여 KTX-II 열차의 주행저항식을 예측하였다.

2. 주행저항식

2.1 Davis equation

철도차량의 주행저항식은 일반적으로 아래와 같은 Davis equation의 형식으로 표현된다[1].

$$R = a + bV + cV^2 \quad (1)$$

* 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부
E-mail : hbkwon@krri.re.kr
TEL : (031)460-5346 FAX : (031)460-5279
** 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

- 위 식에서

R : 주행저항, [daN]

V : 열차 속도, [km/h]

이며, a, b, c는 상수로서 편성차량(총 차량수가 확정) 마다 고유한 값을 가진다.

통상적으로 a, b는 기계적 저항, c는 공기저항에 따라 결정되는 상수로 알려져 있으며, 타행시험을 통하여 도출된다.

2.2 주행저항식 예측 방법

KTX-II 열차는 아직 제작이 완료된 차량이 아니기 때문에 타행시험이 불가능하며, 따라서 식 (1) 형태의 주행저항식을 도출할 수 없다. 또한, KTX-II 열차의 기반이 되는 G7 시제열차는 타행시험을 거쳐 주행저항식을 도출한 바 있으나 7량 편성이기 때문에 이를 KTX-II 열차의 주행저항식으로 변환할 수 없다. 따라서, G7 시제열차의 타행시험에서 도출된 주행저항식을 TGV 열차의 일반 주행저항식의 형태로 바꾼 뒤 G7 열차의 10량편성 주행저항식을 도출하고 이를 바탕으로 형상의 차이점을 감안하여 KTX-II 열차의 주행저항식을 구한다. 아래 그림 1에서는 이러한 일반주행저항식 예측 방법을 도식적으로 설명하고 있다.

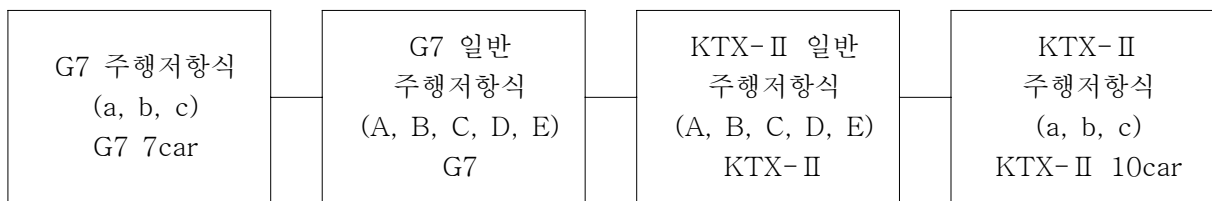


그림 1 일반 주행저항식 예측 방법

3. 예측 결과

3.1 G7 열차 주행저항식 도출

G7 열차의 주행저항은 아래와 같이 타행시험에 의하여 도출되었다[2, 3].

- 시험 일시 : 2002. 8. 9 ~ 2005. 10
- 시험차량 : G7 시제차량(7량 편성)
- 타행 데이터 수 : 4,653개 (100m 평균값)
- 주행저항식 계수 :

$$a = 196.7$$

$$b = 2.610$$

$$c = 0.0338$$

(2)

3.2 G7 열차 일반 주행저항식 도출

먼저, G7 열차의 일반 주행저항식을 도출하기 위한 기본가정은 아래와 같다.

- (1) 본 예측방법은 유선형의 고속철도 차량에 한하여 적용됨
- (2) 본 예측방법은 관절형 대차구조를 갖는 철도차량에 한하여 적용됨
- (3) 그러므로, TGV 열차의 일반 주행저항식을 이용하여 KTX-II 열차의 주행저항 예측함.

그리고, TGV 열차의 일반 주행저항식은 아래 식 (3)과 같이 정의된다[4].

$$R = 0.77\sqrt{(10nM)} + 0.008MV + (0.02225 + 0.00352T)V^2 \quad (3)$$

- 위 식에서

M : 열차 질량, ton

n : 축 수

T : 객차 수

- 이 때, 각 항의 계수들은 TGV 열차의 기계적, 공기역학적 특성에 의해 정해지는 상수이므로 이를 일반적인 계수 A~E로 치환하면 아래와 같은 일반화된 주행저항식을 유도할 수 있다.

$$R = A\sqrt{(BnM)} + CMV + (D + ET)V^2 \quad (4)$$

- 이 때 식 (1)과 식 (4)를 연립하면 주행저항식 계수 a, b, c와 일반 주행저항식 계수 A, B, C, D, E의 관계는 아래와 같다.

$$a = A\sqrt{(BnM)} \quad (5)$$

$$b = CM \quad (6)$$

$$c = D + ET \quad (7)$$

상기를 통하여 G7 열차의 일반 주행저항식을 도출하면 다음과 같다.

- KTX와 G7 차량에 대한 주행저항식 계수 a, b, c는 아래 표 1, 2와 같다 .

표 1 KTX열차 및 G7열차의 주행저항식 계수(7량 1편성)

	KTX 7car (=G7 설계사양)	G7 시제차(7car)
M	326.3	310.0
n	20	20
T	5	5
a	196.7	196.7
b	2.610	2.610
c	0.0399	0.0338

- 위 식에서 KTX의 주행저항식 계수 a, b, c는 M, n, T를 식 (3)에 대입하여 구한 것이고, G7 시제차의 주행저항식 계수 a, b, c는 식 (2)에서 구한 값을 대입한 것이다.

- 위 결과를 이용하여 G7 차량의 일반 주행저항식 계수 A, B, C, D, E를 구해도록 한다.

- 먼저, G7 열차의 계수 A와 B는 식 (5)에 G7 열차의 a 값을 대입하여 구한다.

참고로, A와 B는 정리하면 하나의 상수로 표현 가능하므로, 편의상 B=10으로 고정한다.

$$A = \frac{a}{\sqrt{BnM}} = \frac{196.7}{\sqrt{10 \times 20 \times 310}} = 0.790 \quad (8)$$

- 마찬가지로 식 (6)에 G7 열차의 b 값을 대입하면,

$$C = \frac{b}{M} = \frac{2.610}{310} = 0.00842 \quad (9)$$

- D와 E의 경우에는 방정식의 수에 비해 변수의 수가 하나 더 많으므로 다음과 같은 가정을 도입한다.

KTX 열차에 비해 G7 열차는 보다 유선형화되어 압력저항의 감소를 기대할 수 있는 데, G7열차 개발 과정에서 수행되었던 풍동시험 결과 등을 참고하여 압력저항 감소분을 추정하여 보면, 전두부의 압력저항 감소는 5%이며, 대차커버에 의한 대차저항의 감소는 8%[5, 6]이고, 열차의 압력저항은 전두부의 압력저항과 대차저항으로 구성되며, 그 비율은 6:4이다. 압력저항은 열차의 길이와 무관한 저항성분이므로 이러한 감소분은 D 항에 반영된다. 따라서,

$$D = 0.02225 \times (1 - 0.6 \times 0.05 - 0.4 \times 0.08) = 0.02087 \quad (10)$$

- 앞에서 도출된 G7열차의 D 값과 c 값을 식 (7)에 대입하면,

$$(11)$$

- 따라서, 앞에서 구한 G7열차의 일반 주행저항식 계수를 정리하면 아래와 같다.

표 2 KTX열차 및 G7열차의 일반 주행저항식 계수

	KTX	G7
A	0.770	0.790
B	10	10
C	0.00800	0.00842
D	0.02225	0.02087
E	0.00352	0.00259

3.3 KTX-II 열차의 일반 주행저항식 도출

KTX-II 열차의 일반 주행저항식을 도출하기 위한 기본가정은 아래와 같다.

- KTX-II 열차는 G7열차를 프로토타입으로 개발되었으며, 공기역학적 성능이 거의 동일하므로, G7열차의 일반 주행저항식 계수를 차용할 수 있으나,

- 대차커버 미부착에 따른 대차저항의 증가분을 8%로 가정하여, D 값을 아래와 같이 수정한다.

$$D = D_{g7} \times (1 + 0.4 \times 0.8) = 0.02087 \times (1 + 0.4 \times 0.8) = 0.02154 \quad (12)$$

- 따라서, KTX-II 열차의 일반 주행저항식 계수는 아래와 같다.

표 3 KTX-II 열차의 일반 주행저항식 계수

	KTX- II
A	0.790
B	10
C	0.00842
D	0.02154
E	0.00259

3.4 KTX-II 열차의 주행저항식 도출

위 표 3의 일반 주행저항식 계수를 이용하여 KTX-II 차량의 제원을 식 (3)에 대입하면 다음 표 4와 같이 KTX-II 열차의 10량 편성에 대한 주행저항식 계수를 구할 수 있다.

표 4 KTX-II 열차의 주행저항식 계수(10량 1편성)

	KTX- II 10car
M	434.0
n	26
T	8
a	265.4
b	3.654
c	0.0422

- 따라서 KTX-II 열차의 주행저항식은 아래와 같다.

$$R = 265.4 + 3.654V + 0.0422V^2 \quad (11)$$

- 아래 그래프를 살펴보면, KTX-II 열차는 같은 차량수의 G7 열차보다는 주행저항이 약간 증가하나, KTX 열차보다는 주행저항이 크게 감소한 것을 알 수 있다.

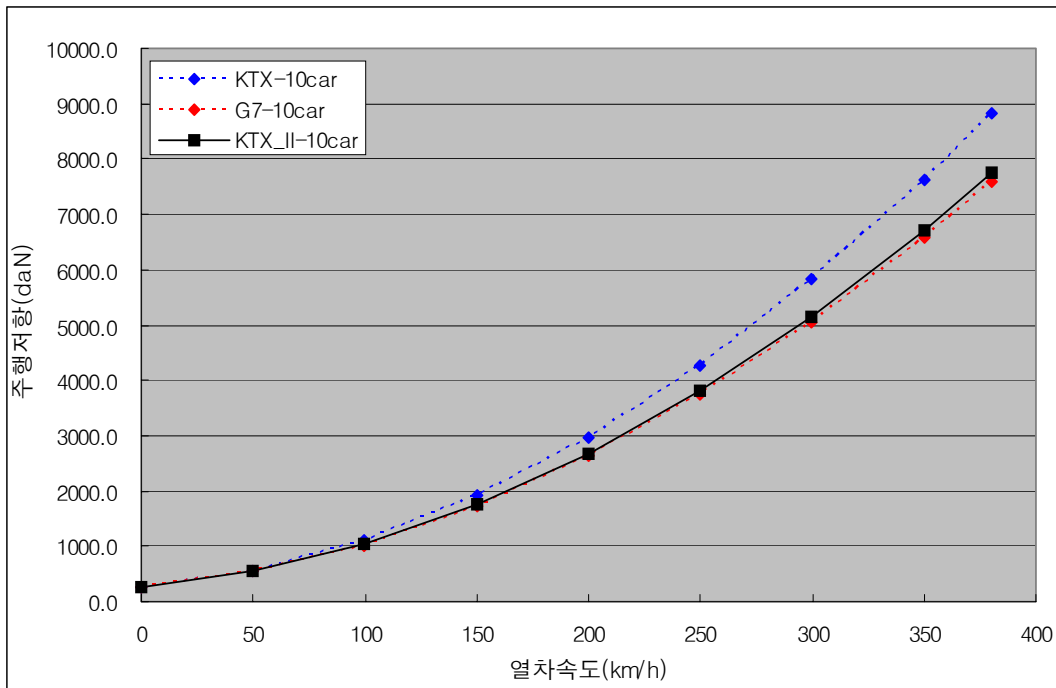


그림 2 고속열차의 속도별 주행저항

3.5 중련편성 시 주행저항 추정

10량 1편성 열차 두 편성을 중련운행하게 될 경우 전체 주행저항은 각각의 열차 주행저항의 합보다 작게 된다. 그 원인은

- 전방 편성차량의 유동교란에 의한 유속 감소로 후방 편성차량의 공기저항 감소
- 전방 편성차량 후미부에서의 유동박리 감소로 인한 압력저항 감소

로 설명할 수 있다.

그러나, 이러한 공기저항의 감소는 편성열차의 긴 길이로 인하여 그 효과가 그리 크지 않을 것으로 예상된다. 참고로, 이러한 중련편성에 의한 공기저항의 변화는 정밀한 풍동시험 또는 중련편성열차의 타행시험을 통해서 정확한 양을 파악할 수 있으나, 많은 시간과 비용의 투입이 문제가 될 수 있다.

따라서, 중련편성 시 주행저항은 각각의 편성열차의 합으로 보고 실질적으로는 이 값을 초과하지 않는 것으로 예측할 수 있다.

4 결론

본 연구에서는 KTX-II 열차의 일반 주행저항식을 예측하고, 이를 통하여 10량 편성으로 예정되어 있는 기본편성에 대하여 주행저항식을 예측하였다. 이를 위하여 KTX-II 열차의 원형인 G7 열차에 대해 수행된 풍동시험과 타행시험의 결과들을 활용하였고, 이를 토대로 합리적인 가정을 통하여 KTX-II 열차의 주행저항식을 예측하였다.

예측 결과, KTX-II 열차는 원형인 G7 열차에 비해 몇 가지 공기저항의 증가요인으로 주행저항이 약간 증가하였지만 전반적으로 KTX 열차에 비해서는 다소 향상된 주행저항을 나타냄을 알 수 있었다.

참고문헌

1. B. P. Rochard and F. Schmiding, "A review of methods to measure and calculate train resistances," *Journal of Railway and Rapid Transit.*, Vol. 214, pp. 185-199, 2000.
2. 한국철도기술연구원, 고속철도시스템 신뢰성 및 운영 효율화 기술개발 4차년도 보고서, 2006년
3. Seog-won Kim, Hyeok-bin Kwon, Young-guk Kim, Tea-won Park, "Calculation of Resistance to Motion of A High-speed Train Using Acceleration Measurements in Irregular Coasting Conditions," *Journal of Railway and Rapid Transit*, 2007(accepted)
4. 한국생산기술연구원, G7 고속전철 시제차량 기본사양, 2001
5. Hyeok-bin Kwon, Dong-ho Lee, Je-hyun Baek, "An Experimental Study of Aerodynamic Drag on High Speed Train," *KSME International Journal*, Vol.14, No.11, pp.1267-1275, 2000.
6. Hyeok-bin Kwon, Young-whe Park, Dong-ho Lee, Moon-sang Kim, "Wind Tunnel Experiments on Korean High-speed Train Using Various Ground Simulation Technique," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.89/13, pp.1179-1195, SEP 2001.