

한국형 고속열차의 주행저항 평가

Evaluation on the Train Resistances for Korean High Speed Train

김영국[†] · 권혁빈* · 김석원* · 박태원**

Young-Guk Kim · Seog-Won Kim · Hyeok-Bin Kwon · Tae-Won Park

Abstract

In this paper, the train resistances for HSR-350x(Korean High Speed Train project), which has been obtained by the coast-down test, have been proposed in cases of the open field and tunnel. They are approximated as quadratic functions suggested by the Davis equation. The coast-down simulations for HSR-350x using the estimated train resistances have performed and the results have been compared with those of the same conditions of the coast-down tests. It is concluded that the proposed train resistances can be considered to provide good estimations for HSR-350x. Also, the effects of the infrastructure conditions, such as tracks, curves and tunnels have been reviewed. These results show that the tunnel plays an important role in determining the train resistance but others does not.

Keywords : Resistance(주행저항), Coast-down test(타행시험), Korean high speed train(한국형 고속열차, HSR-350x), Davis equation(다비스식), Tunnel effect(터널효과)

1. 서 론

2004년 4월 고속철도의 역사적인 개통으로 서울-부산과 서울-목포의 여행시간을 단축시킴에 따라 전국은 반나절 생활권이 되어 지역 간의 교류가 보다 원활히 진행될 수 있게 되었다. 그러나, 미약했던 철도의 국내기술로 인해 고속철도의 개통은 해외로부터 도입된 기술을 통해 이루어 졌다. 국내 철도기술을 한 단계 진보시키기 위한 과정의 하나로 고속철도의 독자적인 기술을 확보하기 위해 정부와 산학연이 협조하여 국가 전략적 사업으로 고속전철기술개발사업(G7)이 1996년부터 시작되어 2002년에 주행속도 350km/h급의 7량 1편성인 한국형 고속열차 시제차량(HSR-350x)이 제작되어 3년여에 걸친 설계입증[1]을 위한 시운전 시험을 통해 국내에서 처음으로 350km/h 주행에 성공함에 따라 일본, 독일, 프랑스 등의 철도 선진국과 같은 수준의 고속철도 설계기술을 국내에서도 확보하게 되었다. 또한, 개발된 고속철도 기술의 실용화를 위해 시제열

차의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위한 시운전시험이 광명-동대구, 광명-목포 구간에서 진행되어 2005년 4월 현재 총 179회, 약 71,000km의 거리를 주행 완료하였다. 시제차량에 대한 설계입증을 위해 주행성능, 대차주행성능, 차체진동성능, 제동성능, 주행저항 등이 포함된 16개의 성능시험이 진행되었다[2-4].

열차의 주행저항은 열차성능계산이나 운행계획에 필요한 항목[5,6]으로 구름마찰, 미끄럼마찰, 공기역학의 기본 법칙들을 이용하여 계산하는 것이 가능하지만, 실제적으로는 주행저항 시험을 통해 추정하고 있다. 주행저항은 열차의 타행 운전과정에서 감속도를 측정하거나 일정 속도를 유지하는 데 필요한 견인력을 원하는 속도범위에서 측정하여 추정한다[5]. 열차의 타행 운전이란 견인력과 제동력이 작용하지 않은 상태에서 관성으로 열차가 운행되는 것을 말한다. 자동차의 주행저항도 타행 운전시 시간에 따른 속도나 거리 변화를 측정하여 추정하는 경우가 많다[7].

본 논문에서는 한국형 고속열차의 주행저항을 3년여에 걸친 시운전 시험 과정에서 획득된 타행 데이터의 분석을 통해 타행 운전에 따라 발생하는 감속도를 이용하여 추정하였으며, 터널, 곡선 등이 주행저항에 미치는 영향을 검토하였다.

[†] 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단
E-mail : ygkim@krrri.re.kr
TEL : (032)460-5612 FAX : (032)460-5649

* 한국철도기술연구원

** 아주대학교 기계공학과

2. 열차 주행저항

타행 운전시에 열차의 진행방향에 대한 작용하는 운동방정식은 뉴턴(Newton)의 제1법칙에 의해 식 (1)과 같다.

$$F = ma = R \pm mg \sin\theta + R_c \quad (1)$$

여기서, F 는 열차의 관성력, m 은 열차 질량, R 은 열차의 주행저항, θ 는 선로구배, R_c 는 곡선저항이며, +는 상구배, -는 하구배를 각각 나타내고 있다.

일반적으로 식 (1)의 첫째 항인 주행저항은 식 (2)와 같이 데이비스(Davis)가 제안한 2차식으로 표현하며 2차항은 공기저항으로 저속 주행의 경우에는 별로 영향을 주지 않는다. 식 (1)의 둘째 항은 구배저항으로 평지에서는 '0'이지만, 실제로 열차가 운행되는 선로는 구배가 있으므로 열차의 관성력에 영향을 미치게 된다. 식 (1)의 셋째 항은 곡선저항으로 250m이하의 심한 곡선부가 아니면 이 효과는 없다고 알려져 있다[5].

$$R = a + bV + cV^2 \quad [daM] \quad (2)$$

여기서, V 는 열차의 주행속도[km/h], a , b , c 는 타행시험을 통해 얻어진 데이터로부터 얻어진 계수이다.

한국형 고속열차의 주행저항의 추정을 위한 타행시험은 Fig. 1과 같이 경부고속선로의 KP 28~KP 145 지점에서 진행되었다. 이때, 열차의 주행속도는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 300km/h까지 각 구간마다 다양하게 변화됨을 볼 수 있다. 또한, 타행시험이 진행된 선로구간의 구배는 -15~18%로 변화하기 때문에 구배저항이 열차에 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 2는 타행시험을 통해 획득된 열차의 주행속도로부터 HSR-350x의 주행저항을 계산하는 흐름도이다. 열차의 주행속도와 주행거리 데이터를 계측시스템으로부터 측정된 후 순간 가속도를 계산하는 동안 발생하는 오차를 방지하기 위하여 열차의 주행속도를 1.5Hz 저주파 통과 필터(low-pass filter) 사용한다. 이 필터링된 주행속도로부터 열차의 관성력에 의해 발생하는 가속도를 구하고 구배효과에 대해 보정을 한 후에 100m 간격마다 평균 가속도와 평균 주행속도를 계산한다. 터널이 열차의 주행저항에 미치는 영향을 파악하기 위해 이들 데이터를 터널과 개활지로 분류시킨다. 다른 운전조건에서도 타행시험을 실시하고 각 조건에 따른 평균 가속도와 평균 주행속도 데이터를 터널과 개활지로 분류하여 수집한다. 터널과 개활지에 대해 수집된 데이터를

이용하여 평균 가속도와 평균 주행속도의 회귀곡선을 구한다. 이 회귀곡선을 이용하여 식 (2)로 표시되는 HSR-350x의 주행저항을 구한 후에 이를 이용한 시뮬레이션을 실시하여 열차의 주행속도와 이동거리를 실제 측정된 결과와 비교하여 열차의 주행저항의 타당성을 검증한다.

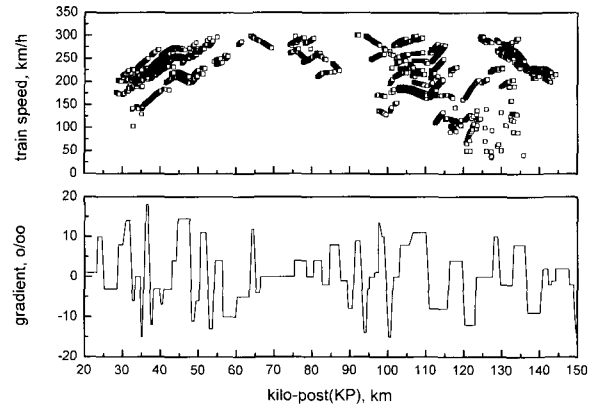


Fig. 1. Train speed and gradient in test range

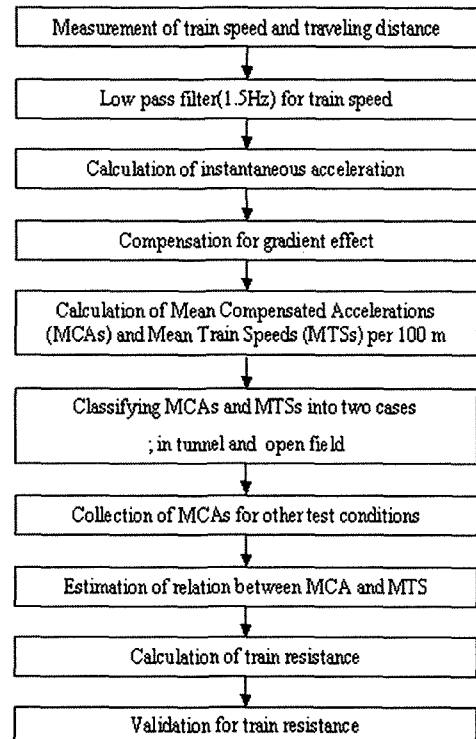


Fig. 2. Flowchart of calculation of train resistance

3. 타행시험 및 주행저항 계산

3.1 한국형 고속열차 시제열차 및 계측시스템

한국형 고속열차 시제차량(HSR-350x)은 7량(동력차 + 동력객차 + 객차 3량 + 동력객차 + 동력차) 1편성으로 구성된다. 객차의 차체는 알루미늄 압출체로 제작되었고, 열차를 전후에서 밀고 당기는 푸쉬-풀(push-pull)형의 동력집중식이며 전동기는 유도형을 채택하고 있다. 또한, 대차는 객차와 객차사이에 설치되는 관절형 대차를 채택하여 주행안전성과 승차감을 향상시킨 것을 특징으로 하고 있다[2,4].

Fig. 3은 계측시스템의 구성도이며, Fig. 4는 계측시스템이 고속열차에 실제 설치된 모습이다. 차륜에 설치된 펄스 발생기로부터 발생된 펄스신호는 주파수/전압 변환기(F/V converter)와 카운터(counter)를 걸쳐 열차의 주행속도와 이동거리로 환산되어 저장된다.

3.2 타행시험

타행시험은 경부고속철도가 운영되고 있는 영업선로인 KP 28~KP 145 지점에서 진행되었으며, 이 구간에는 21개

의 터널과 11개의 곡선부가 설치되어 있고 상행선과 하행선이 다른 선로로 구성되어 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 특정지점이 아닌 여러 지점에서 다양한 주행속도로 타행시험이 이루어졌기 때문에 다양한 운행조건에 따른 타행시험 데이터를 얻을 수 있었으며, 이들 조건에 따른 주행저항을 계산할 수 있었다.

Fig. 5는 KP 132~KP 144 구간에서 다른 날짜에 타행시험이 실시된 경우로 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 타행시험 날짜에 관계없이 동일한 구간에서 거의 동일한 주행속도의 변화를 갖고 있음을 확인할 수 있었으며, 이는 측정된 타행시험 데이터가 신뢰성을 갖고 있음을 보여주는 예이다. 다른 구간에 대해서도 본 논문에는 나타내지 않았지만, Fig. 5와 유사한 결과를 보여준다.

경부고속철도의 경우에 하행(부산방향)과 상행(서울방향)에 따라 다른 트랙을 사용하고 있으므로 이에 대한 영향을 Fig. 6에서 살펴보았다. 그림에서와 같이 트랙에 따른 감소도의 차이는 거의 없으므로 트랙의 차이가 주행저항에 미치는 영향이 없다는 것을 확인할 수 있다. 곡선부가 열차의 주

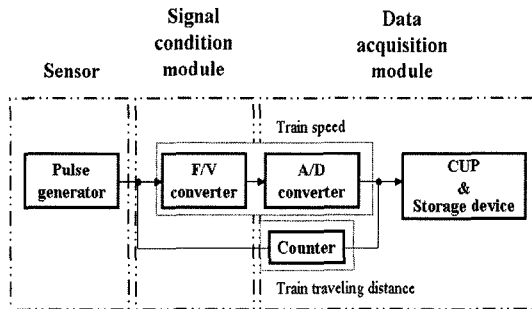


Fig. 3. Schematic diagram of measuring system

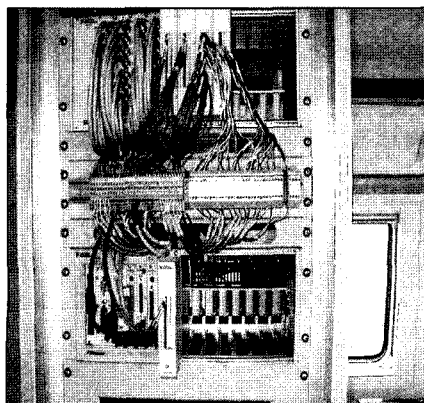


Fig. 4. Experimental set-up of measuring system

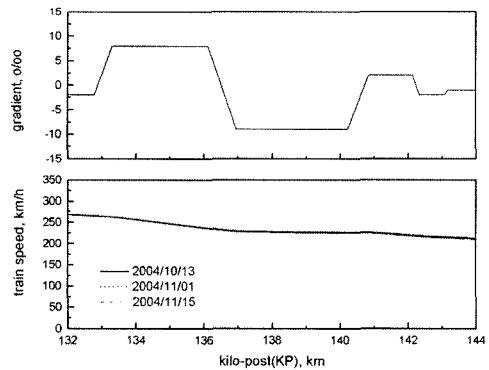


Fig. 5. Variation of train speed from KP 132 to KP 144

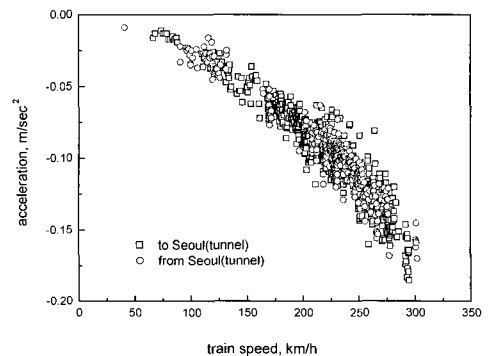


Fig. 6. Variations of accelerations according to train direction in tunnel

행저항에 미치는 영향은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 거의 없다. 경부고속철도의 선로에는 설치된 곡선부는 최소 곡률반경이 7000m이기 때문에 곡선부 효과가 없는 것으로 판단되며, 이는 Rochard[5]의 연구결과와 일치한다. Fig. 6과 Fig. 7은 터널 안에서의 열차의 주행방향과 곡선부의 영향을 나타낸 것이며, 이 논문에는 나타나지 않았지만 개활지에서 동일할 경향을 보였다.

Fig. 8은 개활지에 대해 계측 감속도로부터 최소자승법에

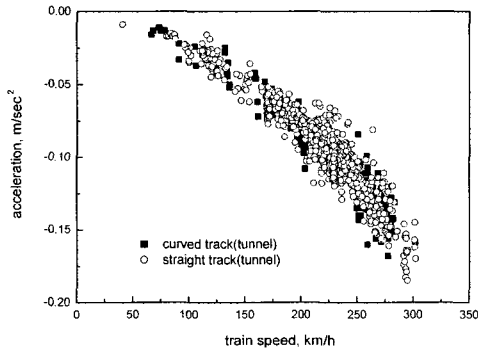


Fig. 7. Variations of accelerations at curved and straight track in tunnel

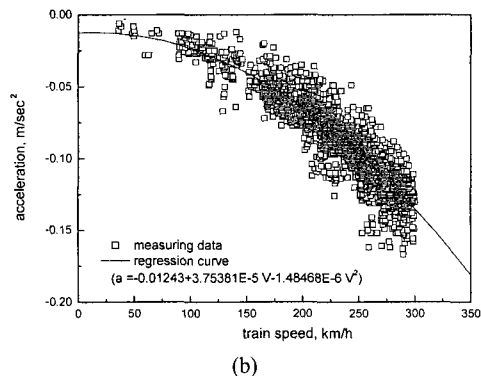
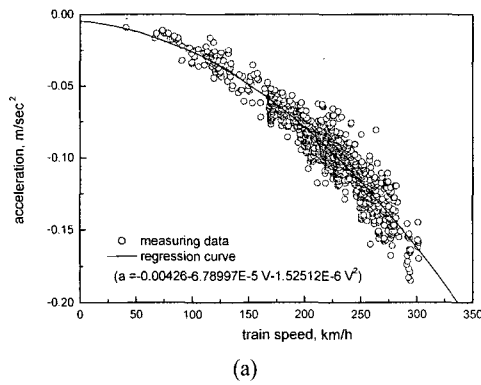


Fig. 8. Measured and estimated accelerations, (a) tunnel, (b) open field

의해 구해진 열차의 주행 속도에 대한 가속도 변화를 나타내는 회귀곡선을 구한 결과로 회귀곡선의 정밀도를 나타내는 지수인 상관계수(correlation coefficient)가 터널의 경우 0.949, 개활지의 경우 0.913으로 아주 양호한 회귀곡선이 얻어졌음을 알 수 있다. 이들 회귀곡선을 이용하여 HSR-350x의 주행저항은 식 (3)과 식 (4)로 표현된다.

• 터널

$$R = 141.2 + 2.251V + 0.0506V^2 [daN] \quad (3)$$

• 개활지

$$R = 412.1 - 1.244V + 0.0492V^2 [daN] \quad (4)$$

Fig. 9는 한국형 고속열차의 설계단계에서 제시되었던 열차의 주행저항 곡선과 타행시험을 통해 실제로 획득된 열차의 주행저항을 비교한 것이다. 설계단계에서 제시된 주행저항식[1]은 한국형 고속열차와 동일한 대차형식, 구동계통, 차량 단면적 등을 갖는 KTX 차량에 대해 Alstom 사에서 제안한 일반 주행저항식에 한국형 고속열차의 중량, 편성 열차 수 및 차륜과 대차 수를 대입하여 도출한 식이다. 그림에서 보는 바와 같이 거의 모든 주행속도에서 일치함을 알 수

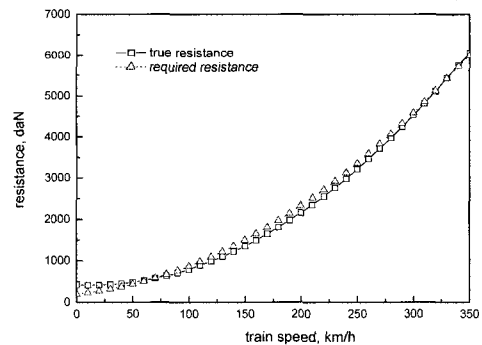


Fig. 9. Comparison between required and true resistance

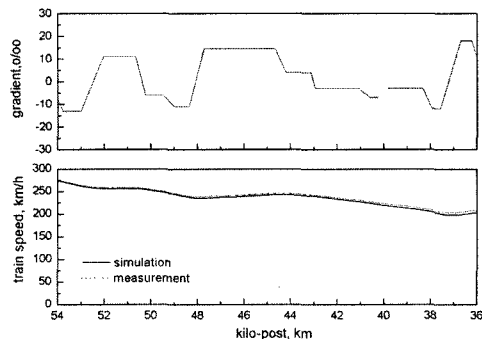
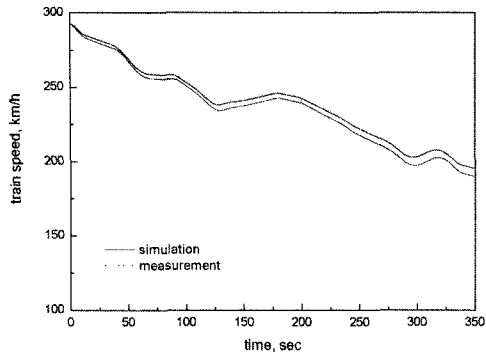
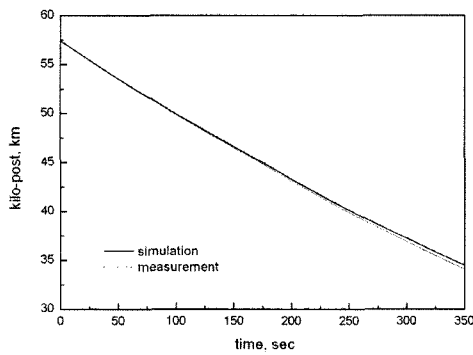


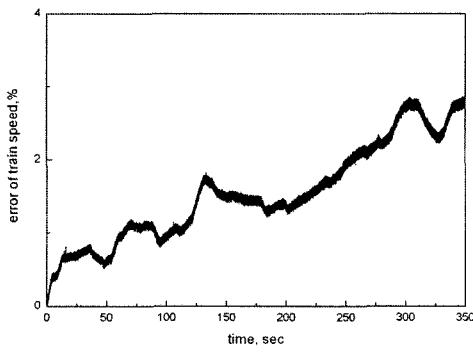
Fig. 10. Comparison measured and analysis result ; KP 57.4 ~ 33.8



(a)

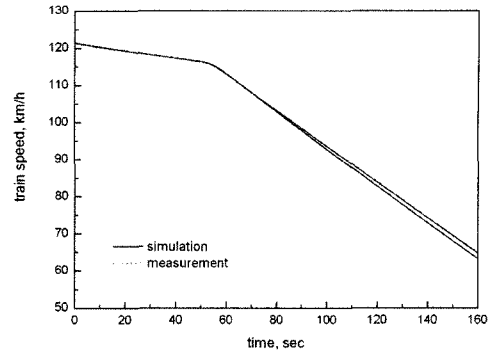


(b)

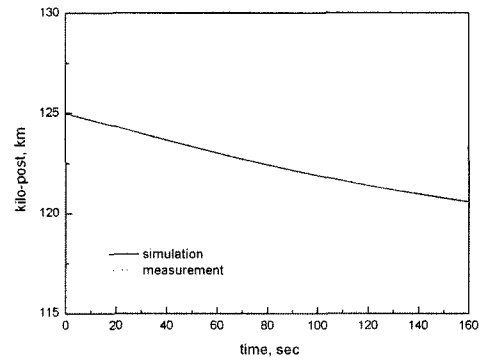


(c)

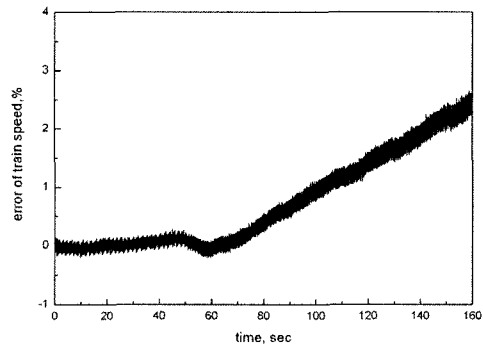
Fig. 11. Validation of result; train speed 293.1~188.4km/h, (a) train speed, (b) train distance, (c) error of train speed



(a)



(b)



(c)

Fig. 12. Validation of result; train speed 121.4~62.8km/h, (a) train speed, (b) train distance, (c) error of train speed

있으며, 이는 열차의 주행저항이 설계기준에 적합함을 보여주는 것이다.

4. 주행저항 검증

특정구간에서 HSR-350x가 타행으로 운전될 때 측정된 결과(열차의 주행속도와 이동거리)와 식 (3)과 식 (4)로 표현되는 열차의 주행저항을 이용하여 동일한 특정구간에서 타행 운전되는 조건의 시뮬레이션을 수행하여 구해진 결과를

비교하여 타행시험을 통해 구해진 HSR-350x의 주행저항에 대한 타당성을 검증하였다.

Fig. 10은 주행저항에 대한 타당성 검증의 한 예이다. 그림에서 보는 바와 같이 타행 운전이 진행된 구간은 -15~18%의 구배를 갖고 있으며, 빈번하게 구배가 변경되는 구간임에도 불구하고 해석결과가 측정결과와 거의 일치한다. 이 구간에 대한 상세한 분석 결과는 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 해석결과와 측정결과에 대한 열차의 주행속도 변화는 (a), 열차의 이동거리 변화는 (b), 해석결과와 측정결과에 대

한 열차의 주행 속도 오차는 (c)에 각각 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 열차의 주행속도와 이동거리의 변화에 대해 해석결과와 계측결과가 잘 일치한다. 이들에 대한 오차를 살펴보면, 열차의 주행속도의 경우는 Fig. 11 (c)에서 볼 수 있는 바와 같이 최대 2.9 %를 나타냈으며, 열차의 이동거리의 경우는 1.7%(이동거리 23,241.1m일 때 오차 395.1m)이었다. Fig. 11은 열차의 주행속도가 293.1~188.4 km/h 범위로 HSR-350x가 고속으로 주행한 경우에 대한 결과이며, HSR-350x가 저속(121.41~62.8km/h)으로 주행하는 경우에 대한 결과가 Fig. 12이다. Fig. 12에서 볼 수 있는 바와 같이 저속의 경우에도 Fig. 11의 고속의 경우와 마찬가지로 열차의 주행속도와 이동거리의 변화에 대해 해석결과와 계측결과가 잘 일치한다. 이들에 대한 오차는 Fig. 12 (c)에서 열차의 주행속도는 최대 2.7%, 열차의 이동거리는 0.4%(이동거리 4426.7m일 때 오차 18.4m)이었다.

Fig. 11과 Fig. 12의 결과로 타행 운전에 대한 해석결과가 동일 조건을 갖는 계측결과와 잘 일치함을 확인하였다. 따라서, 타행시험과 주행저항의 계산을 통해 획득된 HSR-350x에 대한 주행저항식이 잘 유도된 것으로 판단된다.

5. 결론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 타행시험을 통해 한국형 고속열차 시제차량에 대한 주행저항을 구하였고, 이를 회귀곡선식으로 개활지와 터널에 대해 구분하여 제안하였다.
- (2) 제안된 회귀곡선을 사용하여 타행시험을 통해 획득된 계측결과와 동일 조건에서 해석된 결과의 비교 분석을 통해 주행저항식의 타당성을 검증하였다. 해석결과와 계측결과가 잘 일치함을 확인할 수 있었다.
- (3) 제안된 주행저항식이 설계단계에서 제시된 주행저항식과 거의 일치하므로 주행저항 관점에서 한국형 고속열

차의 시제차량이 적절한 설계와 제작이 이루어졌음을 확인할 수 있었고, 향후 다른 편성의 열차 제작 시 연결차량의 증가 혹은 감소에 대한 영향을 고려하여 새로운 주행저항식의 도출에 활용할 수 있을 것이다.

- (4) 선로 및 선로주변의 조건의 변화가 열차의 주행저항에 미치는 영향을 분석하였다. 열차의 주행저항에 대해 터널은 공기저항의 효과로 고속에서 크게 큰 영향을 미칠 수 있었다. 그러나, 선로의 곡선부나 트랙의 차이에 대한 영향은 거의 없음이 확인되었다.

후 기

본 연구는 고속철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. G7 고속전철 시제차량 기본사양, 한국철도기술연구원, 1998.
2. 김영국 등, "시운전 시험을 통한 한국형고속전철 차체진동 특성의 분석 및 평가," 한국철도학회논문집, 제6권, 제4호, 한국철도학회, pp. 332-338, 2003.
3. 김영국 등, "다기능성을 갖는 철도 차량용 승차감 측정시스템 개발," 센서학회지, 제13권, 제5호, 한국센서학회, pp.369-377, 2004.
4. 김영국 등, "시운전 시험을 통한 한국형 고속열차의 승차감 변화 추세에 관한 연구," 센서학회지, 제14권, 제3호 게재예정, 한국센서학회, 2005.
5. B. P. Rochard and F. Schmidig, "A review of methods to measure and calculate train resistances," Journal of Railway and Rapid Transit, Vol.214, pp.185-199, 20008.
6. 이태형, "한국형 고속전철의 열차 주행성능 해석과 경제운전 모형 개발," 박사학위논문, 건국대학교, 2005.
7. 허남건 등, "거리·시간 측정에 의한 고정도 타행시험법 : I. 관련 이론 및 정밀도 향상방법 고찰," 한국자동차공학회논문집, 제3권, 제2호, pp.51-61, 1995.