

타행 시험을 이용한 고속열차 주행저항 평가

Assessment of the Running Resistance of a High-speed Train Using a Coasting Test

권혁빈 · 김석원 · 오혁근*

Hyeok-bin Kwon · Seogwon Kim · Hyuck Keun Oh

Abstract The resistance to motion of the Korean next-generation high-speed train (HEUM-430X) was assessed on the basis of 12 coasting test runs at coasting speeds up to approximately 380km/h. Two different methods, a linear regression method and a time-integral method, were employed to calculate decelerations from the time-velocity data and the time-distance data, respectively, and an equation of resistance to motion was devised from the deceleration data calculated at each time section. The effect of an improvement of the aerodynamic shape on the resistance to motion was investigated, with the results showing that the running resistance was reduced by about 15% due to these improvements. An increase of approximately 28% of the running resistance was also noted when running in a tunnel relative to running through an open field.

Keywords : Resistance to motion, Coasting tests, Aerodynamic drag, High-speed train, Tunnel

초 록 차세대 한국형 고속열차(HEMU-430X)의 주행저항을 타행속도 380km/h에 이르는 고속 타행을 포함한 총 12회의 타행시험 결과를 이용하여 평가하였다. 선형회귀법과 시간적분법의 두 가지 방법을 이용하여 각각 시간-속도 곡선 및 시간-거리 곡선으로부터 가속도를 계산하였으며, 각각의 구간에서 계산된 가속도를 바탕으로 시험 속도 대역에서 근사화된 주행저항식이 도출되었다. 이를 통해 공기역학적 형상 개선에 의해 주행저항이 15% 정도 감소하였고, 터널 주행 시에는 개활지 주행 시에 비하여 약 28%의 주행저항이 증가하는 것으로 평가되었다.

주요어 : 주행저항, 타행시험, 공기저항, 고속열차, 터널

1. 서 론

열차의 주행저항은 견인력과 함께 철도시스템의 최고속도를 결정하는 인자임과 동시에 열차 주행 시의 에너지 소모를 결정하는 인자로서 철도시스템의 운영 계획과 성능 입증에 필수적으로 요구되는 항목이다. 주행저항은 열차의 고유한 특성으로서 열차의 외부 형상과 주행장치의 기계적 특성에 의해 결정되는데, 차량의 개념설계 단계에서는 예측에 근거한 주행저항식을 이용하여 열차의 최고속도, 추진장치의 용량, 에너지 소모 등 중요 시스템 파라메타를 결정하게 되며, 열차의 최종적인 주행저항식은 차량 제작 후 타행시험, 즉 실차에 외력을 가하지 않은 상태에서 타력으로 운행하는 동안의 열차의 속도 변화 또는 주행거리를 측정하여 주행저항을 계산하는 시험을 통하여 평가된다[1].

김석원 등[2]은 한국형 고속열차의 7량 편성 시제차량인 G7열차에 대하여 30km/h에서 300km/h의 속도 영역에서 타행 시험을 수행하여 주행저항을 평가한 바 있다. 시험 중 취득한 시간-속도 곡선의 선형 회귀분석을 통하여 가속도를 계산하였으며, 가속도 추출 구간의 폭 및 회귀분석의 방법을

달리하여 불규칙한 타행 조건 하에서도 강건한 주행저항식 도출 방법을 제시하였다.

권혁빈 등[3]은 앞서 도출된 G7열차의 주행저항식과 축소 모델 풍동시험 결과[4,5]를 바탕으로 G7 열차의 상용화 차량인 KTX-산천 열차의 일반 주행저항식을 제시하고 이를 이용하여 10량 편성 열차의 주행저항식을 예측하였다.

최근에는 도시철도 차량에 대해서도 전산유체역학을 이용한 공기저항 분석을 통하여 주행저항식을 예측하고, 유선형 형상 개선에 의한 에너지 저감 효과를 분석하는 연구가 수행된 바 있다[6].

그러나 앞서 언급한 고속철도 주행저항 연구는 차량 및 선로의 한계로 인하여 300km/h 이하의 속도대역 위주로 이루어져왔다. 또한 분석방법 역시 선형회귀분석을 위주로 사용하였기 때문에, 계산이 간편한 시간적분법에 대한 연구는 부족하였다.

본 연구에서는 차세대 한국형 고속열차(HEMU-430X: High speed Electric Multiple Unit-430km/h experiment)를 대상으로 수행한 타행 시험 결과를 이용하여 주행저항을 평가하였다. 타행 시험은 총 12회에 걸쳐서 150km/h에서 300km/h까지의 속도대역뿐 아니라 330km/h 및 380km/h 등 300km/h 이상 속도대역에서도 수행되었다. 그리고 타행시험을 통하여 취득한 시간 별 속도 및 주행 거리 데이터를 이용하여 차량의 가속도를 계산하였다. 계산된 가속도에 선로의 구배

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-460-5216, E-mail : hkoh@krii.re.kr

©The Korean Society for Railway 2014

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.3.165

효과를 보정한 후 열차의 질량을 곱하여 열차 속도 별 주행저항을 도출하였으며, 주행속도에 따른 주행저항의 근사식을 도출하였다. 가속도 계산 시 선형회귀법과 함께 시간적분법을 이용하여 두 방법의 차이를 분석하였으며, 주행저항 근사식의 물리적 의미를 살펴보았다. 또한, 시운전 시험 중 열차에 적용된 공기역학적 형상 개선의 효과를 주행저항의 변화를 통해 살펴보고, 터널에서의 공기저항을 개활지와 비교하여 분석하였다.

2. 본 론

2.1 타행시험법

2.1.1 열차의 운동 방정식

열차에 작용하는 힘과 열차 운동과의 관계는 뉴턴의 제2법칙에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum F = (M+m)\frac{dV}{dt} \quad (1)$$

위 식에서 $\sum F$ 는 열차에 가해지는 합력, M 은 열차의 질량, m 은 전체 회전 관성의 등가 질량, V 는 열차의 속도이다. 열차의 직선운동은 차축, 기어, 견인전동기 모터 등의 회전운동을 필연적으로 동반하므로 이를 고려하기 위하여 회전 관성모멘트를 등가의 질량으로 환산하여 고려하여야 한다. 회전 관성관성모멘트의 등가질량은 차량에 따라 달라지나, TGV열차의 경우 대략 열차 질량의 4% 정도로 알려져 있다. 본 연구에서는 회전관성을 고려하지 않고, 열차의 총 질량만을 이용하여 주행저항을 계산하였으므로 식 (1)에서 m 은 생략하였다. 또한 가속도 dV/dt 는 이후 a 로 표기하기로 한다.

자연풍에 의한 외력이 없는 직선 선로에서 타행하는 경우, 열차에 작용하는 힘은 주행저항과 구배저항 뿐이므로 식 (1)은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$-R + Mgi = M \cdot a \quad (2)$$

위 식에서 R 은 열차의 주행저항이며, g 는 중력가속도, i 는 선로의 구배로서 열차가 위로 향하는 상구배를 (+)로 한다.

2.1.2 주행저항 계산법

타행 시험으로 주행저항을 계산하는 방법을 다음의 Fig. 1에 도시하여 나타내었다.

먼저, 열차의 타행 시 열차의 속도 및 이동 거리를 측정한다. 본 연구에서는 시제차량에 구축된 종합 측정시스템에서 1000Hz의 데이터 취득율로 측정된 열차의 속도, 거리 신호를 이용하였으며, 추진 신호와 가속신호를 이용하여 열차의 타행 여부를 확인하였다.

두번째로 타행 신호를 확인하여 도출된 타행 구간의 데이터를 선로 구배와 선로 조건에 따라 다시 분할한다. 식 (2)에서 선로구배 즉 i 가 변화하는 경우 가속도가 변화하여 속도 곡선이 직선이 되지 않기 때문에 주행저항을 계산하기 힘들어진다. 또한, 터널에서는 공기역학적 효과로 인하여 개활

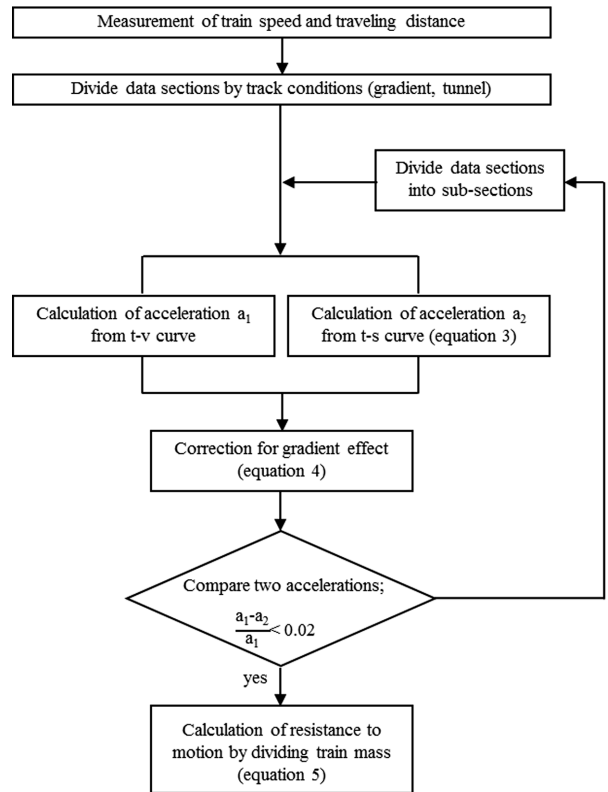


Fig. 1 Flowchart for the calculation of the resistance to motion

지에 비해 공기저항이 증가하므로 이를 구분하여 계산하는 것이 필요하다.

세번째로 분할된 구간에 대해 가속도를 계산한다. 본 연구에서는 시간-속도 곡선(time-velocity curve)에서 최소자승법을 이용하여 가속도를 직접적으로 계산하는 선형회귀법과 초속과 종속을 이용하여 가속도를 계산하는 시간적분법의 두 가지 방법을 적용하여 가속도를 측정하였다. 선형회귀법은 시간-속도 곡선에서 가속도를 직접 구할 수 있으며, Excel 등과 같은 상용 프로그램에서 간단히 활용할 수 있다. 시간적분법은 구간 내 열차의 운동을 등가속운동으로 가정 한 후 속도를 시간에 대해 적분하여 도출된 아래 식 (3)을 이용한다.

$$a = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2(X_2 - X_1)} \quad (3)$$

위 식에서 V_2 , V_1 은 각각 구간 내에서의 종속, 초속을 나타내며, X_1 과 X_2 는 각각 초기 위치와 최종 위치를 나타낸다. 시간적분법은 구간의 경계값만을 사용하는 간단한 대수식으로 표현되기 때문에 계산이 간단하다는 장점이 있으나, 등가속운동 가정을 구간 내 속도의 선형성으로 확인하여야 한다는 단점이 있다[7].

다음으로, 두 가지 방법으로 계산된 가속도에 대하여 선로 구배에 대한 보정을 식 (4)와 같이 실시하고 양자를 비교하여 오차범위 밖에 있을 경우 계산 영역을 다시 분할하여 오차범위 안에 들 때까지 재계산을 수행한다.

$$a_{correct} = a + gi \quad (4)$$

마지막으로 두 가지 방법을 이용하여 도출된 가속도(a1, a2)를 평균하여 이를 식 (5)와 같이 열차 질량을 곱하여서 최종적인 주행저항을 구한다. 본 연구에서 HEMU-430X 열차의 중량은 320ton으로 적용하였다.

$$R(V_{mean}) = M \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (5)$$

위 식에서 주행저항은 분할 구간 내의 평균속도이며, 본 계산 방법을 통하여 최종적으로 각 구간 별로 한 쌍의 평균 속도와 주행저항의 데이터가 도출된다.

2.2 주행저항 계산

2.2.1 타행 시험 데이터

Fig. 2에는 타행시험을 전후하여 측정된 열차의 시간에 따른 위치(KP), 속도, 제동 및 가속 신호를 나타내고 있다. 그림에서 제동 신호와 추진 신호가 모두 off이 되었을 때 열차는 타력으로 운전하고 있다고 볼 수 있다. 타행이 시작됨에 따라 열차의 속도는 감소하면서 서로 다른 기울기를 갖는 세 구간으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 선로의 구

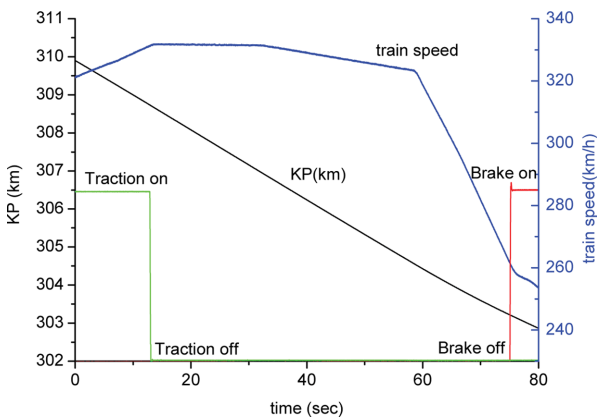


Fig. 2 Train speed and distance curve w.r.t. time

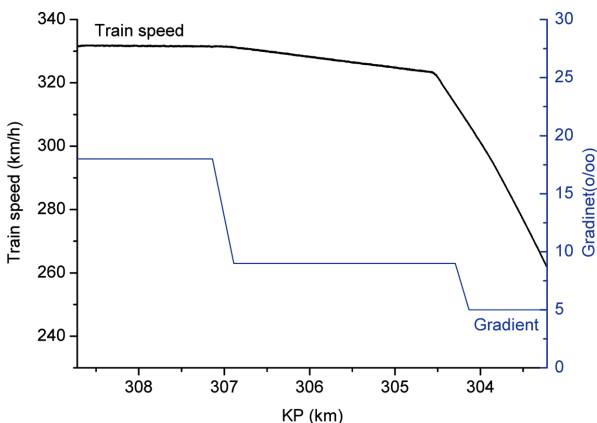


Fig. 3 S-T curve and slope of the track

배가 변함에 따라 열차에 가해지는 중력이 달라지기 때문에 일어나는 현상이다.

Fig. 3에는 Fig. 2에 나타난 데이터들을 위치에 대한 속도 그래프로 나타내었으며, 덧붙여 선로의 구배 정보를 나타내었다. 본 타행 구간에서는 선로의 구배가 하구배 18%, 9%, 그리고 5%로 차례로 변하게 되며, 이에 따라 속도의 기울기가 차례로 급해지고 있는 것을 알 수 있다. 이 때 동일 구배에서는 속도의 기울기가 거의 직선으로 보이는 것을 알 수 있다.

2.2.2 가속도 계산

타행 데이터로부터 주행저항을 계산하기 위하여 동일 선로조건의 구간으로 다시 분할한 뒤 각 구간에서의 평균가속도를 계산하였다.

Fig. 4에는 두 가지 방법으로 계산된 가속도의 오차를 타행 속도에 대해 나타내고 있다. 먼저, 검은 네모 점으로 나타난 구배보정 전 오차는 대체로 0 근처에 집중되어 있으나 간간이 크게 나타나 330km/h 타행 데이터에서는 17.8%의 비교적 큰 차이를 나타내고 있다. 그러나, 구배보정 후의 가속도 오차는 매우 크게 줄어들어서 최대 1.1%에 불과하였다. 이는 하구배를 진행하는 경우 주행저항에 맞먹는 구배저항이 발생하여 가속도의 절대값이 0에 가까워져 오차의 크기가 크게 나타나는 것처럼 보이는 현상으로 구배효과를 보정한 이후에는 가속도의 절대값이 0보다 훨씬 커지기 때문에 두 방법에 의한 가속도의 오차는 거의 나타나지 않게 되는 것이다. 따라서, 두 방법의 실질적인 오차는 구배보정 후의 결과로 판단하여야 하며, 구배 보정 후의 오차가 매우 낮은 수준을 유지하는 것으로 보아 선형회귀법과 시간적분법을 이용한 두 가지 가속도 계산 방법이 거의 동일한 결과를 보여준다고 생각할 수 있다. 따라서 선형성이 확인된 타행 데이터에 대해서는 시간적분법을 이용한 주행저항 분석이 타당하다는 것을 보여준다.

Fig. 5와 Fig. 6에는 구배 보정 전의 가속도와 구배 보정 후의 가속도를 각각 타행 평균속도에 대하여 나타내고 있다. 터널에서는 공기저항이 크게 증가하기 때문에 개활지와 터널을 구분하였으며, 열차의 공기저항 저감 대책이 적용된 전

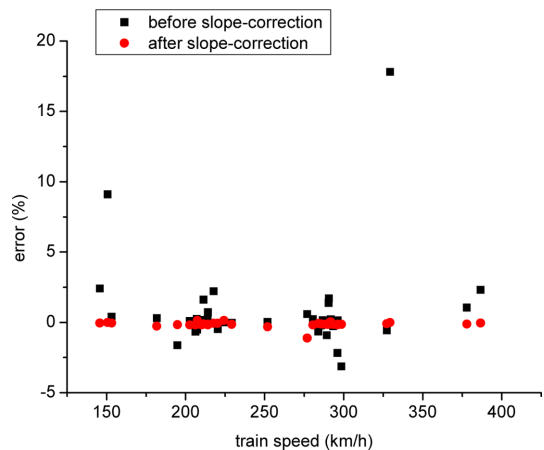


Fig. 4 Error of acceleration between the two calculation methods

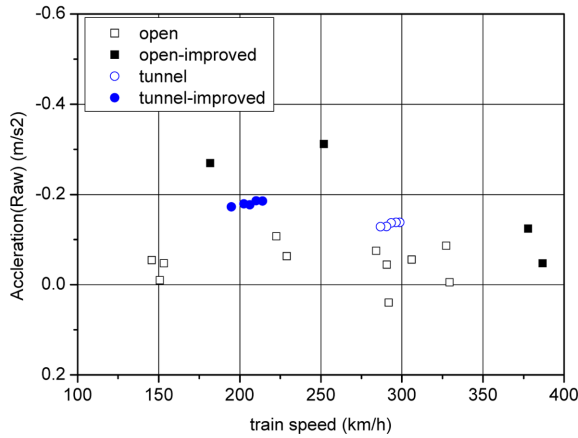


Fig. 5 Accelerations during coasting (slope-uncorrected)

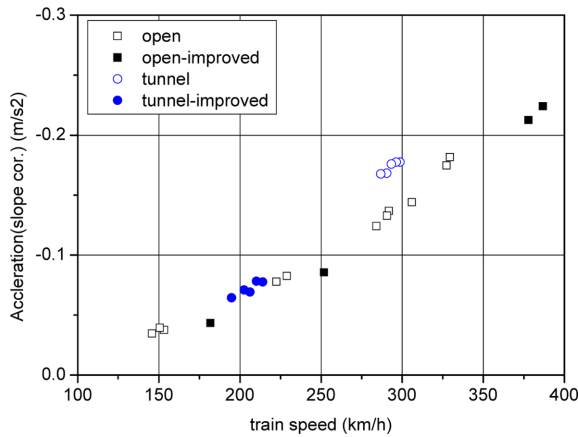


Fig. 6 Accelerations during coasting (slope-corrected)

후에 대해서도 구분하였다. 다만 본 연구에서 수행된 타행 시험은 시험열차의 종합 시운전시험의 일부로서 시간적, 공간적 제약으로 인하여 타행 구간, 속도 및 반복회수를 일정하게 유지하는데 어려움이 있었다. 그러나, 이러한 제약사항에도 불구하고 각각의 가속도 데이터들은 두 가지 계산법을 통해 나온 결과들을 상호 비교하여 시간-속도 곡선의 선형성을 확인함으로써 충분한 신뢰성을 확보하였다.

Fig. 5에서 가속도는 속도에 따른 경향성이 나타나지 않는데, 이는 타행시험이 수행된 구간의 선로구배가 일정하지 않기 때문에 구배의 영향이 불규칙적으로 작용하여 나타난 결과로 볼 수 있다. 반면, Fig. 6에 나타난 선로구배가 보정된 이후의 가속도는 속도가 증가함에 따라 일정한 경향을 가지며 증가하게 되는 것을 볼 수 있다.

2.3 주행저항 평가

2.3.1 주행저항식

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

$$R = a + bV + cV^2 \quad (6)$$

식 (6)에서 a, b, c 는 상수로서 열차마다 고유한 값을 가지는데, 통상적으로 a, b 는 기계적 저항, c 는 공기저항에 따라 결정되는 상수로 알려져 있다.

앞 절에서 구한 속도 별 주행저항을 식 (6)에 나타난 2차 다항식의 형태로 근사화하면 주행저항식을 산출할 수 있다. Fig. 7은 개활지에서의 주행저항 데이터를 2차 다항함수로 근사화한 곡선이며, 주행저항 개선 전후에 대하여 각각 나타내었다.

아래 그림에서 2차 다항식으로 근사화된 곡선은 측정된 주행저항 데이터와 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 이 때 근사화된 곡선에 대한 2차 다항식을 주행저항식이라 한다.

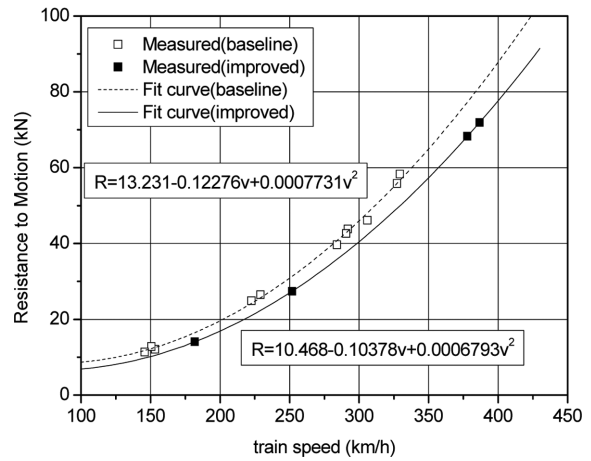


Fig. 7 Resistance to motion w.r.t train speed (open field, measurement)

그런데, Fig. 7에서 도출된 주행저항식을 살펴보면 1차항의 계수가 각각 -0.12276(개선 전)과 -0.10378(개선 후)로 음의 값을 갖는 것을 알 수 있으며, 이는 속도에 반비례하는 주행저항 성분이 있다는 것을 의미한다. 또한, 그림에서 살펴보면 0km/h에서 100km/h 속도 대역에서는 주행저항이 오히려 속도에 따라 감소하는 결과를 낳는다. 이상의 결과는 상수항과 1차항의 합에 해당하는 기계적 저항이 속도에 비례한다는 Davis 방정식의 물리적 의미와 상충되는 결과이다.

Table 1에는 HEMU-430X의 주행저항식 계수들을 예측식, 개선 전 타행측정값 및 개선 후 타행측정값에 대하여 나타내었다. 고속열차의 주행저항 예측식은 통상적으로 열차 형상이 정해지기 전에 유사한 형식의 열차의 주행저항식을 참조하여 정해지며[3], HEMU-430X 열차의 경우에도 이러한 방식으로 개발 초기에 예측식이 정해진 바 있다[8]. 예측식

Table 1 Coefficients of the Davis equation

	a	b	c
Estimation	4.490	0.00443	0.0003683
Baseline	13.231	-0.12276	0.0007731
Improved	10.468	-0.10378	0.0006793

은 열차의 구체적인 형상요소들을 반영하지 않았기 때문에 실제 설계가 완료된 후 제작된 시제열차의 타행시험결과와 Table 1과 같이 차이를 나타낼 수 있다.

통상적인 Davis 방정식의 해석에 있어서 c 값은 공기저항 계수를 나타내는데, 측정된 결과는 개선전이 2.1배, 개선 후가 1.84배의 공기저항을 갖는다는 것으로 해석될 수밖에 없다. 그러나, 이는 1차항의 계수가 음수가 됨에 따라 2차항의 계수가 과대평가 되었기 때문에 나타나는 결과라고 볼 수 있다.

따라서, Fig. 7에 나타난 근사화 곡선은 통상적인 Davis 방정식의 형태라기보다는 150km/h에서 400km/h의 속도영역에서 유효한 근사화 곡선으로 이해하여야 할 것이다. 주행저항을 2차 다항식으로 근사화할 때 데이터의 선택에 따라 1, 2차항의 계수가 민감하게 변하는 현상이 종종 발생하며 이를 방지하기 위하여 기계적 저항이 알려진 열차의 경우에는 상수항과 1차항을 고정한 후 근사화 곡선을 구하여 2차항의 계수를 얻기도 한다[2]. 그러나, 본 연구에서는 신뢰할만한 기계적 저항의 데이터가 없기 때문에 기계적 저항과 공기역학적 저항의 분리는 어려우며, 상기 두 저항의 분리는 향후 저속에서의 시험결과를 보완하여 도출하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 공력특성에 의한 주행저항 특성 분석을 위하여 c 값을 이용하는 것이 아닌 주행저항 그 자체를 비교하는 방향으로 검토하였다.

2.3.2 공기역학적 형상 개선에 따른 주행저항 변화

본 연구에서는 시운전시험 도중 열차의 속도한계를 시험하기 위하여 Fig. 8과 같이 차간 연결막의 적용과 대차커버의 설치 등 열차의 공기역학적 형상 개선 작업이 이루어졌다[9].

주행저항 예측값 및 실제 타행시험을 통해 얻어진 주행저항 데이터들 간의 비교를 위하여 각 속도 대역 별로 예측



(a) Installation of side fairing : before (left) and after (right)



(b) Installation of bogie cover : before (left) and after (right)

Fig. 8 Side fairing and bogie cover to reduce aerodynamic drag

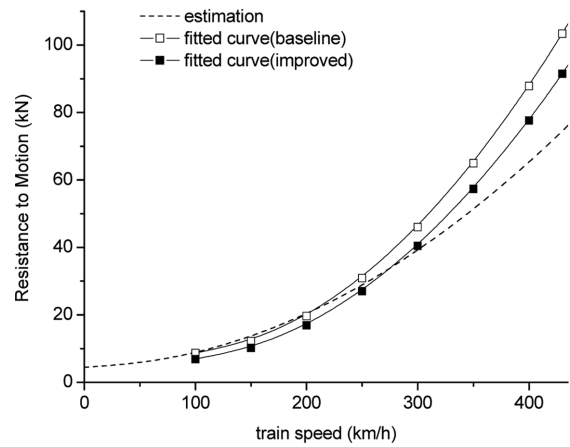


Fig. 9 Resistance to motion w.r.t train speed (open field, approximation curve)

식과 타행시험결과와의한 주행저항식을 Fig. 9에 함께 나타내었다.

먼저, 개선 전 형상의 경우에는 200km/h 속도까지는 예측식 대비 최대 9% 주행저항에 적게 나타남을 알 수 있으며, 250km/h 이상의 속도에서는 예측식 대비 점점 증가하여 400 km/h에서는 주행저항이 예측식 대비 35% 가량 더 높게 평가됨을 알 수 있다.

형상 개선 후에는 예측식에 비해 250km/h까지 최대 24% 주행저항이 더 낮게 측정되었으며, 400km/h에서는 예측식 대비 19% 주행저항이 증가하는 것으로 볼 수 있다. 또한 공기역학적 형상 개선 전후의 주행저항을 비교해보면, Fig. 7에서와 같이 주행저항이 200km/h 이상의 속도에서는 대략 15% 내외로 주행저항이 분명하게 저감된 것을 확인할 수 있으며, 이를 통하여 공기저항 저감을 위한 열차 형상 개선 작업이 상당한 효과를 나타냈음을 알 수 있다.

또한 Table 1과 Fig. 9에서와 같이, 주행저항 예측식과 실제 타행결과가 300km/h 이상의 고속영역에서 큰 차이가 나는 것을 알 수 있으며, 이 차이는 속도가 증가함에 따라 더 커지는 경향이 있다. 앞서 밝혔듯이 주행저항 예측식은 실제 타행시험 결과와 차이를 보일 수 있으며, 이는 차량의 상세설계 및 제작 과정에서 돌출부나 공동부 등 공기저항에 영향을 미치는 인자들이 발생할 수 있기 때문이다. 그러나 주행저항 예측식을 실차에서의 계측치와 근접시킬 수 있는 추후 연구가 필요하며, 300km/h 이상의 영역에서는 기존이론을 바탕으로 한 예측식은 한계가 있다고 판단된다.

2.3.3 터널에서의 주행저항 변화

터널 구간에서의 공기저항은 넓은 속도구간에 대한 충분한 타행 계측 데이터를 확보하지 못하였기 때문에 근사화를 이용한 주행저항식의 계산이 불가하였다. 그러나 개활지에서의 주행저항 측정결과는 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 근사화한 주행저항식과 잘 일치하므로 개활지 대비 터널에서 주행저항을 비교하는 것이 유효하다고 판단하였다. 따라서, 본 연구에서는 각 측정속도별 터널 주행저항값을 시험근사식의 해당속도 개활지 주행저항값과 비교하여 Table 2에 나

타내었다.

아래 표에서 보이듯이 터널 내에서의 공기저항은 개활지에 비하여 약 23%에서 31%까지 평균 28% 높게 나타나며, 이는 터널 내 통과 시 차량 전방의 압력상승에 의한 공기저항의 증가 효과로 볼 수 있다. 측정된 데이터의 범위 내에서는 속도대역 및 차량 형상 개선 전후 조건과의 상관관계는 나타나지 않았다.

Table 2 Resistance to motion in a tunnel in comparison with an open field

Train speed (km/h)	Resistance to motion(kN)		$R_{\text{tunnel}}/R_{\text{open}}$
	Tunnel (measurement)	Open field (Approximation curve)	
298.7	56.2	45.5	123%
296.4	56.8	44.8	127%
293.4	56.3	43.8	129%
290.5	54.2	42.8	126%
286.9	53.7	41.6	129%
210.2	25.0	18.7	134%
214.0	24.9	19.4	129%
202.6	22.7	17.3	131%
206.2	22.0	18.0	123%
194.9	20.2	16.0	126%
Average			128%

3. 결 론

본 연구에서는 차세대 한국형 고속열차(HEMU-430X)를 대상으로 수행한 타행 시험 결과를 이용하여 주행저항을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 최소자승법을 이용하여 가속도를 직접적으로 계산하는 선형회귀법과 등가속운동의 운동방정식을 적분하여 계산하는 시간적분법을 이용한 두 가지 가속도 계산 방법을 적용한 결과 두 방법이 거의 동일한 결과를 나타내었다. 따라서, 선형성이 확인된 타행 데이터에 대해서는 시간적분법을 이용한 간단한 대수식의 계산으로 가속도를 도출할 수 있다.

2) 구간별 주행저항을 2차 다항식으로 근사화하여 150km/h에서 400km/h 사이의 속도 영역에서 유효한 주행저항식을 도출하였다. 그러나, 전체 주행저항식에서 기계적 저항과 공기저항의 분리는 저속에서의 시험결과를 보완하여 도출하는 것이 필요하다.

3) 시험열차의 공기역학적 형상 개선 전후의 주행저항 감소율을 보면, 200km/h 이상의 속도에서는 대략 15% 내외로 주행저항이 저감된 것으로 나타났으며, 이를 통하여 공기저항 저감을 위한 열차 형상 개선 작업이 상당한 효과를 나타냈음을 알 수 있다.

4) 터널 내에서의 공기저항은 개활지에 비하여 약 23%에서 31%까지 평균 28% 높게 나타나며, 이는 터널 내 통과 시 차량 전방의 압력상승에 의한 공기저항의 증가 효과로 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 철도기술개발사업 중 430 km/h급 고속열차(HEMU-430X) 기술개발 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] B. P. Rochard and F. Schmiding (2000) A review of methods to measure and calculate train resistances, *Journal of Railway and Rapid Transit*, 214, pp.185-199.
- [2] S.W. Kim, H.B. Kwon, Y.G. Kim, T.W. Park (2006) Calculation of resistance to motion of a high-speed train using acceleration measurements in irregular coasting conditions, *Proc. IMechE*, 220, pp.449-459.
- [3] H.B. Kwon, S.W. Kim, Y.G. Park, C.S. Park (2007) A Prediction of the Equation of Resistance to Motion for Korean High-speed Train, *Proceeding of KSR fall Conference*, Uiwang, pp.1-7.
- [4] H.B. Kwon, D.H. Lee, J.H. Baek (2000) An Experimental Study of Aerodynamic Drag on High Speed Train, *KSME International Journal*, 14(11), pp.1267-1275.
- [5] H.B. Kwon, Y.W. Park, D.H. Lee, M.S. Kim (2001) Wind Tunnel Experiments on Korean High-speed Train Using Various Ground Simulation Technique, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(13), pp.1179-1195.
- [6] H.B. Kwon, J.S. Hong (2013) Aerodynamic Drag Reduction on High-performance EMU Train by Streamlined Shape Modification, *Journal of the Korean Society for Railway*, 16(3), pp.169-174.
- [7] N. Hur, I. K. Ahn, V. A. Petrushov (1995) High-Accuracy Coastdown Test Method by Distance-Time Measurement : I. Theoretical Background and Discussions on Accuracy Improvements, *Transactions of KSAE*, 3(2), pp.51-61.
- [8] C.S. Park *et al.* (2008) Annual report on Development of system engineering technology for distributed traction-type high speed rail, Korea Railroad Research Institute, Construction & Transportation R&D Report, pp. 38-39.
- [9] H. K. Oh, H.B. Kwon, S.S. KIM, D. Choi, S. Kim (2013) The running resistance characteristic of next generation high speed train (HEMU-430X), *Proceeding of KSR fall Conference*, Daegu, pp.867-871

접수일(2014년 3월 10일), 수정일(2014년 5월 18일), 게재확정일(2014년 6월 5일)

Hyeok-bin Kwon: hbkwon@ut.ac.kr

Department of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobangmul-gwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-763, Korea

Seogwon Kim: swkim@krii.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-763, Korea

Hyuck Keun Oh: hkoh@krii.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-763, Korea