

고속열차 외부장치에 의한 주행저항 기여도 연구

A Study on the Contribution of Exterior Devices to Running Resistance in High-Speed Trains

오혁근 · 광민호 · 권혁빈* · 김상수 · 김석원

Hyuck Keun Oh · Minho Kwak · Hyeok-bin Kwon · Sang-soo Kim · Seogwon Kim

Abstract The contribution of exterior devices such as bogie fairings and pantographs to running resistance was estimated on the basis of coasting tests at up to 350 km/h with the help of the Korean Next Generation High speed train (HEMU-430X). In order to assess the reduction of air resistance by nose car's bogie fairing, coasting tests were conducted with a removable bogie fairing at various speed ranges. And, the contribution of the pantograph to air resistance was also estimated with coasting tests that include the pantograph's rising and descent modes. The linear regression method was used to examine decelerations from time-velocity data and the equation of resistance to motion is proposed from the deceleration data. From the aerodynamic term of the equation of resistance to motion, the contribution to air resistance by nose car's bogie fairing and pantograph was estimated. The results show that the air resistance was reduced by about 3.8% by the nose car's bogie fairing. And, the 3.9% increase of air resistance by the pantograph (open knee mode) has been found.

Keywords : High speed train, Running resistance, Coasting tests, Bogie fairing, Pantograph.

초 록 고속열차의 외부장치인 선두부 대차 페어링과 팬터그래프에 의한 주행저항 기여도를 차세대 한국형 고속열차(HEMU-430X)를 이용하여 최대 350km/h까지의 타행시험을 통하여 간접적으로 평가하였다. 선두부 대차페어링에 의한 공기저항 저감도를 평가하기 위하여 대차 페어링을 부착 및 탈착 하였을 때 각각 타행시험을 속도대역별로 실시하였다. 또한, 팬터그래프에 의한 공기저항을 측정하기 위하여 팬터그래프를 상승 및 하강 시켰을 때 각각 타행시험을 실시하였다. 타행시험의 결과로부터 시간-속도선도에 대한 가속도를 선형회귀법으로 산출하여 주행저항식으로 도출하였고, 도출된 주행저항식의 공기저항계수 부분을 이용하여 대차 페어링 및 팬터그래프의 공기저항 기여도를 산출하였다. 그 결과 선두부 대차 페어링의 공기저항 감소효과는 약 3.8%이며, 비상모드 팬터그래프는 공기저항을 약 3.9% 증가시키는 것으로 평가되었다.

주요어 : 고속열차, 주행저항, 타행시험, 대차 페어링, 팬터그래프

1. 서 론

일본과 유럽에서 시작된 고속철도는 2004년 한국의 KTX개통 이후로 중국의 총연장 16,000km의 고속철도를 포함하여 빠르게 성장하고 있으며, 그 경제적 파급효과도 매우 크기 때문에 터키, 미국, 호주, 말레이시아 등도 고속철도의 건설을 진행 중이거나 검토 중에 있다. 그러나 고속철도가 도입된 이후로 30년이 지난 지금도 최고 운영속도는 300km/h 수준에 머물고 있는데, 그 이유는 속도에 증감함에 따라 급격하게 증가하는 주행저항으로 인하여 에너지 소모가 매우 증가하여 운영효율성이 떨어지기 때문이다. 따라서 고속철도의 에너지 효율 향상 및 친환경성 확보를 위하여 고속철도의 주행저항 저감을 위한 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 특히 열차의 주행저항은 견인력과 함께 고속철도의 최고 및 운영속도를 결정하는 핵심 시스템 요구사항으로서 열차의 외부형상과 주행장치의 기계적 특성에 의해서 결정된다. 고속열차의 설계단계에서는 경험적 식과 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)등을 이용한 수치해석을 통하여 주행저항을 예측한다. 또한 열차가 제작된 이후에는 실차에 외력을 가하지 않은 상태에서 타력으로 운행하는 동안의 속도변화를 이용하여 열차의 주행저항을 측정하는 타행시험을 통하여 그 주행저항을 평가하게 된다[1].

*Corresponding author. Tel.: +82-31-462-8737, E-mail : hbkwon@ut.ac.kr.

© 2015 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2015.18.4.309>

특히 고속열차가 300 km/h 이상으로 주행하는 경우 공기저항은 주행저항의 80% 이상을 차지한다고 알려져 있으며 이 공기저항은 속도의 제곱에 비례하여 증가하기 때문에, 고속열차의 공기저항 성분의 분석 및 각각의 성분별에 대한 저감방안 연구가 활발히 진행되고 있다[2].

고속열차의 타행시험에 대해서는 김석원 등[3]과 권혁빈 등[4]이 각각 350km/h급 시험차량인 G7열차와 430km/h급 시험차량인 HEMU-430X(High speed Electric Multiple Unit-430 km/h eXperiment)를 대상으로 주행저항을 평가하였다. 김석원 등[3]은 불규칙한 타행 조건에서도 신뢰성 있는 주행저항식을 도출할 수 있는 방법론을 제시하였으며, 권혁빈 등[4]은 대차 페어링 및 차간연결부 사이드 페어링 등을 적용하여 주행저항을 저감시킬 수 있음을 실차시험을 통하여 증명하였다. 또한 최근에는 앞서 언급한 전산유체역학을 이용하여 도시철도차량에 대한 주행저항식을 예측하는 연구 역시 수행되었다[5].

그러나 고속열차의 외부장치에 의한 공기저항 특성은 실차 타행시험에서는 여러 제약조건이 따르기 때문에 주로 풍동시험과 전산유체역학 해석 등을 통해서 많이 수행되어져왔다. 실제로 HEMU-430X에 대한 타행시험 연구[4]는 해당차량의 증속시험과 동시에 진행되어 사이드페어링과 대차 페어링을 동시에 적용하였을 때의 효과만 기술되어 있어서 각각의 주행저항 저감에 대해서는 설명하지 못하였고, 특히 선두부 대차 페어링의 주행저항에 대한 영향도가 다른 대차 페어링 대비 매우 크다고 알려져 있음에도 불구하고[6,7] 전 주행에서 선두부 대차 페어링을 부착한 상태로 주행하여 그 기여도에 대한 실차 조건에서의 평가가 부족하였다.

문지수 등[6]은 이러한 제약조건들로 인하여 전산유체해석을 통하여 HEMU-430X의 각 대차에 의한 공기저항 기여율을 평가하고 측면 대차 페어링 적용 시 공기저항을 저감시킬 수 있음을 보였다. 또한 권혁빈 등[7]은 축소모델 풍동시험을 통하여 선두부 대차 페어링에 의한 공기저항 저감이 가장 큼을 확인하였다.

한편 팬터그래프는 고속열차의 대표적인 돌출물로서 외부유동에 직접 노출되고 복잡한 형상으로 인하여 고속전철의 공기역학적 항력 중 약 8%정도 차지하고 있는데 팬터그래프의 개선을 통하여 열차의 전체저항의 2%까지 감소시킬 수 있다고 보고되고 있다[8]. 이로 인하여 잠망경 형태 등의 다양한 팬터그래프 형상의 공력특성에 대한 풍동연구가 수행되어져 왔으며[9], 강건한 팬체드 설계에 따른 공력특성 역시 전산유체역학적 연구와 실험적 연구가 병행하여 이루어졌다[10].

그러나 이러한 연구들은 대부분 풍동시험에서 축소모델을 이용한 연구로서 레이놀즈 상사(Reynolds analogy)적인 측면에서 실제 팬터그래프의 항력을 예측하는 데 한계가 존재하였다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 권혁빈[11] 등은 차체고속열차의 실제 팬터그래프 모델에 대하여 풍동시험을 통하여 양력 등 공기역학적 특성을 평가하였으나 항력에 대한 특성은 평가하지 않았다. 또한 고태환 등[12]도 전산유체해석을 통하여 차체대고속열차의 팬터그래프의 항력 및 양력 특성을 평가하였으나 실제 차량 주행 시 항력 특성에 대해서는 아직 보고된 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 고속열차의 외부장치인 선두부 대차 페어링과 팬터그래프의 주행저항에 대한 기여도를 HEMU-430X의 타행시험을 통하여 실제차량 운행환경에서 검토하였다.

2. 본 론

2.1 타행시험방법

2.1.1 열차의 운동방정식 및 주행저항 계산법

타행시험을 통한 주행저항 산출에 사용되는 열차의 운동방정식 및 주행저항 계산법은 기존의 연구[4]에서 상세하게 제시되어 있으므로 본 연구에서는 간략한 소개만을 한다. 열차의 운동방정식은 뉴턴의 제2법칙에 의해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

위 식에서 ΣF 는 열차에 가해지는 외력, M 은 열차의 질량, m 은 전체 회전 관성의 등가 질량, V 는 열차의 속도이다. 열차의 타행시험을 직선 선로에서 실시하게 되면, 열차에 작용하는 외력은 주행저항과 구배저항 뿐이므로 식 (1)은 다음과 같이 표현할 수 있다. 통상적인 열차에서 질량은 차체와 대차 프레임이 대부분을 구성하며 휠과 차축 등 회전부의 질량 및 관성 모멘트는 크지 않으므로 본 연구에서는 열차의 회전관성 등가질량 m 은 고려하지 않는다.

$$-R + Mg\theta = Ma \quad (2)$$

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

타행시험을 통하여 열차의 가속도 a 를 측정하고 타행시험구간의 선로구배 θ 가 주어져있다면 열차의 질량으로부터 주행저항 R 의 계산이 가능하다.

본 연구에서는 HEMU-430X 시험차량에 구축된 종합 계측시스템에서 1000Hz의 데이터 취득율로 타행시험 시 열차의 속도, KP (Kilo Post: 열차의 선로도상 위치)신호를 측정하였으며, 차량의 TDCS신호를 RS-485통신으로 동시에 측정하여 열차의 추진신호와 제동신호로부터 열차의 타행 여부를 확인하였다. 차세대고속열차의 계측시스템에 대한 상세한 정보는 참고문헌 [13]에 상세하게 기술되어 있다.

한편 타행시험을 통하여 측정된 시간, 속도 데이터는 계측된 KP 데이터를 이용하여 구배와 선로 조건에 따라 다시 분할한다. 그 이유는 식 (2)에서 선로구배 θ 가 변화하는 경우 가속도가 변화하여 속도 곡선이 직선이 되지 않기 때문에 차량의 가속도를 측정하기 어려워진다. 본 연구에서는 분할된 구간의 가속도를 시간-속도 선도(time-velocity curve)로부터 선형회귀법을 통하여 시간-속도 선도의 기울기인 가속도를 측정하였고, 측정된 가속도에 대하여 선로구배에 대한 보정을 다음의 식 (3)과 같이 실시하여 수정된 가속도 $a_{correct}$ 를 도출하였다.

$$a_{correct} = a + g\theta \quad (3)$$

이 도출된 수정가속도에 열차의 질량 M 을 곱하게 되면 식 (4)와 같이 열차의 주행저항을 계산할 수 있고, 이 식에서 주행저항은 분할 구간내의 평균속도에 대한 결과가 된다.

$$R(V_{mean}) = Ma_{correct} \quad (4)$$

2.1.2 선두부 대차 페어링에 의한 주행저항 영향도 평가를 위한 타행시험

선두부 대차 페어링에 의한 주행저항 영향도를 평가하기 위하여 선두부 대차 페어링을 부착한 상태와 탈착한 상태 각각에 대해 타행시험을 실시하였다. 실제 고속열차 차량은 양방향으로 운행하기 때문에 HEMU-430X의 선두부 대차 페어링 역시 다음 Fig. 1과 같이 양쪽 선두차량 첫 번째 대차의 좌우 양쪽 측면에 각각 2개씩 총 4개가 설치되어 있다. 따라서 실제 선두부 대차 페어링을 탈착한 상태에서의 타행시험은 Fig. 2와 같이 양쪽 선두차량의 대차페어링을 모두 제거하고 실시되었다. Fig. 3은 선두차량의 대차 페어링이 붙어있는 상태로서 선두부 대차로의 유동 유입을 억제하도록 설계되어 있다. 실제로 대차 페어링 탈부착 시 전산유체 역학 해석결과 [6]에 의하면 대차 페어링이 없는 경우 대차 측면에서 유동의 유입 및 유출이 활발하게 이루어지고 있으며 이 유동은 대차 부근에 기류를 형성하여 대차 및 차체의 압력저항을 발생시킨다고 기술되어 있다. 특히 선두부 대차부근은 유동 경계층의 성장이 막 시작되는 상태이기 때문에 다른 차량 대비 강한 유동의 유입이 예상이 되므로 공기저항 저감을 위해서는 반드시 필요한 장치이다. 따라서 본 연구에서는 선두부 대차 페어링을 부착한 상태에서 150~350km/h까지 타행시험을 실시하였으며, 선두부 대차 페어링을 탈착한 상태에서는 100~320km/h까지 타행시험을 실시하였다. 타행시험의 실시구간은 신설된 호남고속선 익산 ~ 모안



Fig. 1. Schematic picture of HEMU-430X train set and bogie fairing of nose car.



Fig. 2. Detachment of bogie fairing.



Fig. 3. Attachment of bogie fairing.



Fig. 4. Rising mode of pantograph.

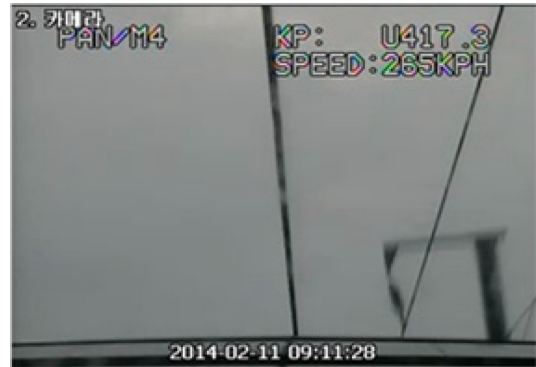


Fig. 5. Descent mode of pantograph.

IEC 구간 중 개활지를 택하여 수행하였으며, 차량의 주행방향은 증속시험과 동일한 방향인 MC차량을 선두방향으로 하여 타행시험을 실시하였다.

2.1.3 팬터그래프에 의한 주행저항 기여도 평가를 위한 타행시험

본 연구에서는 HEMU-430X의 타행시험을 통하여 팬터그래프가 주행저항에 미치는 영향도를 평가하고, 이를 통하여 팬터그래프에 의한 공기저항을 간접적으로 파악하고자 한다. 팬터그래프의 주행저항을 평가하기 위해서 팬터그래프 상승모드와 및 하강모드에서 각각 타행시험을 수행하여 그 차이를 팬터그래프에 의한 주행저항으로 판단하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 팬터그래프를 상승 및 하강시켰을 때 차량 옥상부에서 촬영한 사진으로서 팬터그래프를 하강하였을 때 팬터그래프가 페어링 안쪽으로 완전히 들어가 유동의 영향을 덜 받게 된다는 사실을 알 수 있다. 한편 고속열차 차량에는 차량의 주행방향 기준으로 앞쪽과 뒤쪽에 팬터그래프가 존재한다. 한국의 고속열차에서는 일반적으로 열차 운행 시 한 개의 팬터그래프만을 상승시킨 채로 운행하게 되며, 정상 팬터그래프 (차량 뒤쪽 팬터그래프가 상승한 경우)를 사용할 때의 주행저항이 차량의 기본 주행저항으로서 150km/h~410km/h 까지 타행시험을 실시하여 그 주행저항을 획득하였다. 앞뒤의 팬터그래프를 모두 하강한 상태에서는 타행시험을 270~330km/h 까지 실시하였기 때문에 본 연구에서는 350km/h까지의 데이터만을 사용하여 팬터그래프를 하강시켰을 때의 주행저항과 비교하였다. 또한 통상 주행 시 정상 팬터그래프 모드에서는 팬터그래프로 유입되는 유속이 경계층의 성장과 팬터그래프 페어링으로 인하여 낮기 때문에 그 영향이 작게 된다. 따라서 앞쪽의 팬터그래프만 올라가는 비상팬터그래프 모드 상태에서의 타행시험도 230~305km/h까지 실시하여 팬터그래프에 의한 항력을 평가할 수 있도록 하였다. 또한 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해서 비교 대상인 팬터그래프외의 모든 공기역학적인 조건은 동일하게 세팅하였다. 다만 앞선 대차 페어링 탈부착 타행시험 조건과의 차이점은 증속시험을 위하여 전 대차에 대차 페어링이 부착되어 있고 M4차량의 상부페어링이 탈착된 상태라는 점이다.

2.2 주행저항 평가

2.2.1 주행저항식

고속열차 차량의 주행저항은 일반적으로 아래와 같은 Davis equation의 형식으로 나타낼 수 있고[1,4] 그 단위는 힘의 단위인 N 혹은 kN 등을 많이 사용한다.

$$R = a + bV + cV^2 \tag{5}$$

위 식에서 a , b , c 는 상수로서 열차마다 고유한 값을 가지고, 통상적으로 a , b 는 기계적 저항에 의하여 결정된다고 알려져 있으며, c 는 열차형상 등의 영향을 받는 공기저항에 따라 결정되는 상수로 알려져 있다. 특히 c 는 열차의 단면적과 공기밀도를 이용하여 다음의 식 (6)과 같이 공기저항계수 C_D 로 변환이 가능하여, 형상변화에 따른 공기저항계수 변화를 정량적으로 평가할 수 있다. 여기서 ρ 는 공기밀도, A 는 기준단면적으로 시험차량의 길이 방향 단면적에 해당하는 $10m^2$ 을 적용하였다.

$$C_D = \frac{2c}{\rho A} \tag{6}$$

특히 본 연구에서는 열차의 형상의 변화만 주어서 타행시험을 실시하였으므로 각각의 경우에 대한 주행저항 결과를 식 (5)를 이

용하여 Curve fitting하여 주행저항식을 도출할 수 있다. 단 이 때 차량의 형상만이 변화하였으므로 기계적 저항을 표현하는 상수항 a 와 1차항 b 는 전 경우에 대하여 동일한 값을 적용하고 오직 2차항 c 만을 Curve fitting한 결과로부터 공기저항계수인 C_D 를 도출하여 대차 페어링 및 팬터그래프에 의한 항력을 간접적으로 평가하였다.

2.2.2 선두부 대차 페어링에 따른 열차 주행저항 변화

선두부 대차 페어링의 탈부착에 따른 타행시험 결과로부터 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 각 속도대역별 주행저항을 Fig. 6에 나타내었다. 또한 각각의 주행저항 결과로부터 식 (5)를 이용하여 근사화한 주행저항식을 Fig. 6에 같이 나타내었다. 이 때 주행저항식 산출 시 a , b 의 값은 앞서 언급한 바와 같이 대차 페어링 탈부착에 상관없이 동일한 값을 부여하였다. 타행시험 결과에서 보이는 보이는 바와 같이 열차의 주행저항이 선두부 대차 페어링을 탈착하였을 때 증가하는 것을 볼 수 있고 이 경향은 속도가 증가함에 따라 더욱 두드러진다. 주행저항식으로부터 도출한 공기저항계수 C_D 는 Table 1과 같이 선두부 대차 페어링 탈착 시 1.132이고, 선두부 대차 페어링 부착 시 1.089로서 선두부 대차 페어링 부착 시 전체 공기저항계수가 약 3.8% 저감되는 것을 확인할 수 있다.

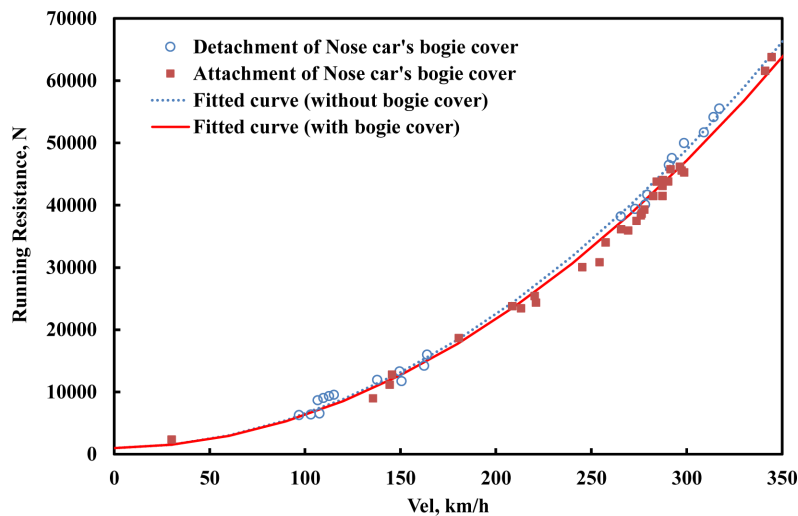


Fig. 6. Running resistance with and without nose car's bogie fairing.

Table 1. Aerodynamic drag coefficient with and without nose car's bogie fairing.

	Drag coefficient (C_D)
Attachment of nose car's bogie fairing	1.089
Detachment of nose car's bogie fairing	1.132
Reduction rate for aerodynamic drag	3.8%

2.2.3 팬터그래프에 의한 열차 주행저항 변화

정상 팬터그래프 모드 및 하강 모드 그리고 비상 팬터그래프 모드 시의 타행시험은 팬터그래프 모드만의 비교를 위하여 다른 공기역학적 조건(페어링 부착 등)은 동일한 조건으로 실시하였고, 그 결과를 Fig. 7에 각각의 경우에 대한 주행저항식과 함께 도시하였다. Fig. 7에서와 같이 정상 팬터그래프 모드와 팬터그래프 하강 모드에서는 주행저항이 거의 차이가 나지 않음을 확인할 수 있다. 그러나 비상 팬터그래프 모드에서는 300km/h 이상 고속영역에서 정상 팬터그래프 모드 대비 주행저항이 증가함을 알 수 있다. 정상 팬터그래프 모드와 팬터그래프 하강모드가 차이가 나지 않는 것은 앞서 설명한 바와 같이 팬터그래프가 차량 진행방향의 뒤쪽에 위치하고 있어서 경계층 성장에 따른 팬터그래프 유입유속의 감속과 팬터그래프 페어링에 의한 상대적 유속의 감소가 원인이라고 판단된다. 물론 데이터 개수의 부족으로 인한 오차에 의하여 정상 팬터그래프에 의한 주행저항 증가가 작게 평가될 수 있다는 점도 배제할 수는 없다. 반면에 비상 팬터그래프 모드에서는 경계층의 성장이 아직 덜 되었기 팬터그래프로 유입되는 유속이 차량의 주행속도와 거의 동일하고[14], 이로 인하여 팬터그래프에 의한 주행저항 증가효과가 두드러졌다고 판단된다. 앞서와 마찬가지로 주행저항식으로부터 도출한 공기저항계수 C_D 는 Table 2와 같이 정상 팬터그래프 모드에서 1.008, 비상 팬터그래프 모드 1.048, 팬터그래프 하강모드에서 1.008로서 비상 모드 팬터그래프 시 전체 공기저항계수를 약 3.9% 증가시키는 것을 알 수 있다.

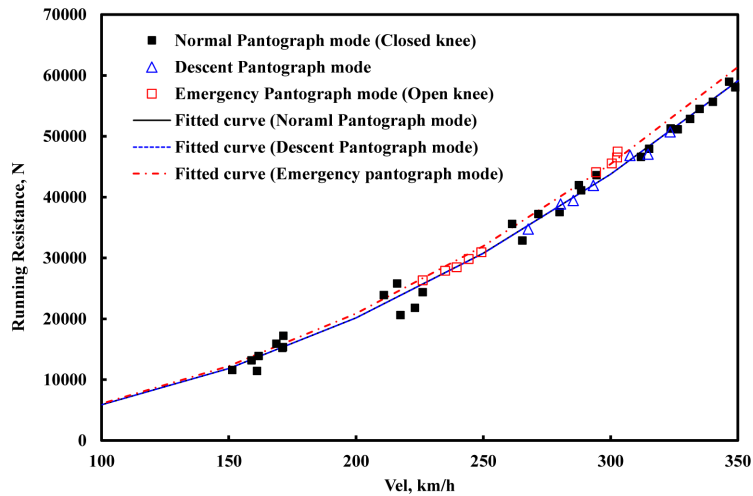


Fig. 7. Running resistance of vehicle for each pantograph mode.

Table 2. Aerodynamic drag coefficient of vehicle for each pantograph mode.

	Drag coefficient (C_D)
Normal mode	1.008
Descent mode	1.008
Emergency mode	1.048

한편 정상팬터그래프 모드의 공기저항 계수 1.008은 선두부 대차 페어링을 부착시킨 경우의 공기저항계수 1.089 대비 7.5% 작은 값을 보이고 있는데 이는 HEMU-430X의 증속시험을 위하여 선두부 대차 페어링 뿐 아니라 전 대차에 대차 페어링의 부착 및 상부페어링을 제거하는 등 공기역학적 개선을 적용한 결과이나 본 연구에서는 다루지 않는다.

2.3 대차 페어링과 팬터그래프에 의한 항력 영향 평가

2.3.1 대차 페어링에 의한 항력 저감 효과

앞서 제시된 바와 같이 선두부 대차 페어링에 의하여 HEMU-430X 열차의 공기저항을 약 3.8% 저감할 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 저감의 원인은 문지수 등[6]이 설명한 바와 같이 대차부로 유입 및 유출되는 유동을 차단하여 대차 및 차체의 압력저항을 낮춰주기 때문이다. 특히 선두부 대차는 유동이 더욱 강하게 유입되는 부분으로서 대차 페어링에 의한 공기저항 저감이 더욱 두드러진다. 한편 1/20 스케일 축소모델의 풍동시험을 통하여 선두부 대차 페어링에 의한 공기저항 저감을 평가한 결과[7]에 따르면 공기저항계수가 0.42에서 0.39로 약 7.1% 저감 가능하다고 보고가 되어있다. 이는 풍동시험 모델이 3량으로 구성되어 6량으로 구성된 시험열차 대비 압력저항의 기여율이 더 크기 때문이라고 판단된다. 따라서 선두부 대차 페어링은 열차의 공기저항 저감을 위하여 반드시 필요한 장치이며, 선두부 대차 페어링이 없는 KTX-산천에 적용할 경우 상당한 주행저항 저감의 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다.

2.3.2 팬터그래프에 의한 항력 증가 효과

팬터그래프에 의한 항력은 비상모드 팬터그래프와 팬터그래프 하강모드 사이의 주행저항 차이로부터 계산할 수 있다. 이러한 계산이 가능한 이유는 비상모드 팬터그래프의 위치가 주행방향 기준 두 번째 차량의 앞쪽에 위치해 있어서 경계층의 두께(0.37m)가 매우 작기 때문에[14] 차량의 주행속도만큼의 유속을 팬터그래프가 체감하기 때문이다. Fig. 8은 비상모드(open knee) 팬터그래프의 속도에 따른 항력특성을 Fig. 7의 주행저항식의 차이로부터 계산한 결과이며 이를 KTX-산천에 사용되는 CX 팬터그래프의 풍동시험 항력 측정결과[14] 및 HEMU-430X 팬터그래프의 CFD를 이용한 항력 계산값[12]과 비교하였다. 타행시험을 통하여 추출한 HEMU-430X 팬터그래프의 항력은 CX 팬터그래프 주위에 페어링이 있는 경우와 없는 경우의 중간정도에 위치한다. CX 팬터그래프와 HEMU-430X의 팬터그래프가 동일한 형상은 아니나 팬터그래프 항력의 대략적인 크기는 유사할 것으로 판단되며 300km/h 주행 시 대략 1600N 정도의 항력을 가질 것으로 평가되며, 이는 전체주행저항의 약 3.7% 수준이다. 또한 CFD 해석결과와 비교하

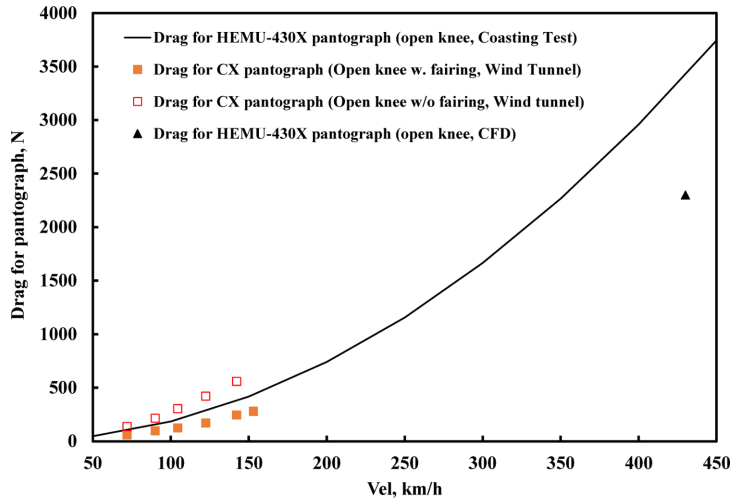


Fig. 8. Drag estimation result for pantograph.

면 상당히 큰 항력을 보여주는데 이는 팬터그래프 해석 모델에는 팬터그래프에 설치된 각종 케이블 등에 의한 단면적 증가 및 열차주행 시 팬터그래프로 유입되는 복잡한 난류 유동 등이 반영되지 않았기 때문이라고 판단된다. 한편 팬터그래프에 의한 주행저항 증가는 분명하다고 판단되며 향후 공력저감 팬터그래프에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

3. 결 론

본 연구에서는 고속열차의 선두부 대차 페어링 및 팬터그래프와 같은 외부장치에 의한 주행저항 기여도를 실차주행 상태에서 평가하기 위하여 HEMU-430X 시험차량을 이용하여 타행시험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 선두부 대차 페어링 탈착 및 부착 조건에 따른 타행시험을 실시한 결과, 실차 주행 시 선두부 대차 페어링의 부착에 따른 공기저항 저감율이 약 3.8%임을 확인하였으며, 이는 선두부 대차로 유입되는 유동의 억제에 따른 압력저항 저감 때문이다. 또한 상기 결과는 기존의 축소모델 풍동시험 및 전산유체해석의 결과와의 비교를 통하여 재확인되었다.
- 2) 실차 주행 시 팬터그래프 모드(정상, 하강, 비상)에 따른 타행시험을 실시하였고, 이를 통하여 팬터그래프에 의한 공기저항이 약 3.9%수준인 것으로 나타났다. 팬터그래프에 의한 항력은 300km/h 주행 시 약 1600N 정도 인 것으로 평가되며 이는 기존 팬터그래프의 풍동시험결과와 그 크기면 에서 유사한 수준인 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 건설교통기술촉진사업인 ‘고속열차용 저소음/저저항 팬터그래프 공력설계 기술 및 플스케일 팬터그래프 형상 개발’과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] B.P. Rochard, F. Schmiding (2000) A review of methods to measure and calculate train resistances, *Journal of Railway and Rapid Transit*, 214, pp. 185-199.
- [2] H.B. Kwon, H.K. Oh (2013) Decomposition and reduction of aerodynamic drag of high-speed train, *Proceedings of the WCRR 2013*, Sidney.
- [3] 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, *Journal of Railway and Rapid Transit*, 220, pp. 449-459.
- [4] H.B. Kwon, S.W. Kim and H.K. Oh (2014) Assessment on the Running Resistance of High-speed Train Using Coasting Test, *Journal of the Korean Society for Railway*, 17(3), pp. 165-170.

- [5] 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.
- [6] J.S. Moon, S.W. Kim and H.B. Kwon (2014) A study on the aerodynamic drag reduction of high-speed train using bogie fairing, *Journal of Computational Fluids Engineering*, 19(1), pp. 41-46.
- [7] H.B. Kwon, Y.H. Park, D.H. Lee, M.S. Kim (2001) Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89, pp. 1179-1195.
- [8] J.L. Peters (1983) Aerodynamics of very high speed trains and maglev vehicles: state of the art and future potential, *International Journal of Vehicle Design*, Special publication SP3, pp. 308-341.
- [9] Y. Lee, J. Rho, M. Kwak, J. Lee, *et al.* (2010) Experimental studies on aerodynamic characteristics of various types of pantograph for high speed train, *The 8th Euromech Fluid Mechanics Conference(EFMC8)*, Bad Reichenhall, Germany.
- [10] J. Rho, Y. Lee, K. Kim, D. Lee (2010) Experimental Investigations on Aerodynamic Characteristics of scaled Pantograph System with various Panhead Shape for High Speed Train, *6th IUTAM Symposium on Bluff Body Wakes and Vortex Induced Vibrations*, Capri Island, Italy.
- [11] H.B. Kwon, Y.H. Cho, K. Lee, K.N. Kim (2009) A real-scale wind tunnel testing on a pantograph for high-speed train to assess the aerodynamic characteristics, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(5), pp. 732-737.
- [12] T. Ko, K.N. Kim (2013) Numerical simulation for the pantograph of new-generation high-speed train, *Proceedings of KSCFE Spring Conference 2013*, Jeju, pp. 148-151.
- [13] S.H. Ryu, J.H. Hong (2011) A study on overall measurement system development of HEMU-400X, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(6), pp. 484-488.
- [14] K.H. Kim, C.Y. Kim, H.K. Oh (2013) Aerodynamic design of lower acoustic noise/aerodynamic drag pantograph system for high speed train, Appendix pp. 33, pp. 116-117.

(Received 1 June 2015; Revised 22 July 2015; Accepted 23 July 2015)

Hyuck Keun Oh : hkoh@krri.re.kr

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

Minho Kwak : mhkwak@krri.re.kr

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

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

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

Sang-Soo Kim : sskim@krri.re.kr

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

Seogwon Kim : swkim@krri.re.kr

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