

고속열차 주행저항 일반식 분석 및 검증

Analysis and Validation of a General Expression for High-Speed Train Resistance

윤수환*†, 곽민호*, 남성원*, 오혁근*, 김석원*

Su-Hwan Yun*†, Min-Ho Kwak*, Seong-Won Nam*, Hyeok-Keun Oh, Seok-won Kim*

Abstract A general expression of resistance for a high-speed train is needed to obtain a resistance formula at a system design process. Resistance formulas of KTX-Sanchon and HEMU-430X was made with a general expression developed in France and Japan for a concentrated power train and a multiple power train. Resistance obtained by the formulas was compared with running test results. The computed resistance of KTX-Sancho and HEMU-430X does not agree with the running test results. However, considering the resistance increase, the general expression can be useful to make a resistance formula for a system design process.

Keywords : High-speed train, Resistance formula, Concentrated power, Multiple Power, System deign

초 록 시스템 설계단계에서 주행저항식을 도출하기 위해서는 고속열차의 주행저항 일반식이 필요하다. 국외에서 개발된 동력집중식과 동력분산식 고속열차의 주행저항 일반식을 이용하여, KTX산천과 HEMU-430X)에 대한 주행저항식을 도출하였다. 그리고 도출된 주행저항식을 통해 계산된 주행저항과 실차시험 결과와 비교였다. KTX산천과 HEMU-430X의 주행저항은 시험결과와 일치하지 않았다. 하지만, 주행저항 증가추세를 고려하면, 주행저항 일반식은 시스템 설계 단계에서 유용하게 활용될 수 있다.

주요어 : 고속열차, 주행저항식, 동력집중, 동력분산, 시스템 설계

1. 서 론

고속열차의 주행저항은 시스템 설계단계에서 출력제원을 결정하기 위한 매우 중요한 자료이다. 특히, 최고속도를 예측하기 위해서는 반드시 주행저항선과 출력성능선을 비교해야 하기 때문에 주행저항식 도출이 반드시 필요하다. 우리나라에서 HSR-350X를 개발하면서 주로 프랑스 TGV 자료를 근거로 주행저항식을 만들어 적용하였다. 그러다 보니, KTX와 동력시스템이 다른 HEMU-430X의 시스템설계 시 주행저항식 도출에 많은 어려움을 겪었다. 하지만, 일반적으로 고속열차의 주행저항식은 그 형식이나 값에 있어 어느 정도 경향성을 가진다. 이러한 경향성을 바탕으로 변화된 차량의 주행저항식에 대한 유추가 가능하다. 따라서, 본 논문에서는 국내외 다양한 고속열차의 주행저항식을 검토하고, 차량시스템에 따른 경향성을 분석한다. 그리고 편성열차의 주행저항식 도출방법에 대해서 논하고자 한다.

† 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부(shyun@krri.re.kr)

* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

** 한국철도기술연구원 철도안전인증센터

2. 본 론

2.1 국내외 고속열차 주행저항식

2.1.1 고속열차 주행저항 일반식

철도차량의 주행저항식은 David 식으로 불리는 식(1)과 같이 2차 다항식을 기반으로 하고 있다.

$$D = A + BV + CV^2 \quad (1)$$

여기서 A는 기계적 구름저항으로 열차의 질량이 비례하며, B는 동력차의 냉각공기 혹은 객실을 공기조화로 인한 공기의 운동량 손실에 의해, 그리고 C는 공기역학적 저항에 의해 나타나는 저항이다. 하지만, 시스템 설계단계에서 차량구성에 따른 주행저항을 도출하기 위하여 각 나라마다 고유의 주행저항 일반식을 만들어서 사용한다. 프랑스에서는 동력집중식 고속열차를 위해 식(2) 같은 주행저항 일반식을 사용한다.

$$D = \{0.77\sqrt{10nM} + 0.008MV + (0.0225 + 0.00352T)V^2\}/100 \quad (kN) \quad (2)$$

N: 열차의 축수, W: 열차의 중량(t), T: 객차의 수, V: 속도(km/h)

2.1.2 KTX산천에 대한 일반식 적용

식(2)의 주행저항 일반식을 KTX산천에 적용하면, 다음과 같은 식으로 나타난다[1].

$$D(kN) = 2.49 + 0.03224V + 0.000507V^2$$

도출한 주행저항식, 주행시험결과 그리고 CFD 결과를 조합한 그래프를 Fig.1에 제시하였다.

Fig.1에서 a는 주행저항 일반식을 이용한 그래프이며, b는 식(1)의 A와 B를 주행저항 일반식에서 구하고, C를 CFD 결과로 적용한 주행저항 값이며, c는 실차시험에서 A와 B를 구하고, C는 CFD로 의해 구한 그래프이며, d는 실차시험결과 그래프이다. A는 실차시험 결과 보다 다소 크게 나타나지만, 주행저항 증가 추세를 잘 따라간다. 그리고 b 그래프는 저속에서는 다소 차이가 있지만, 고속에서는 시험값에 근접하고 있다. 그리고 c의 고속에서 약 5% 이내의 오차가 있지만, 전체적으로 잘 시험결과와 잘 일치한다.

2.1.2 HEMU-430X에 대한 주행저항식 적용

프랑스와 달리 동력분산식 고속열차를 운영하는 일본에서는 신간센 300계와 700계에 대하여 다음과 같은 식을 사용한다[2].

$$D(\text{kN}) = 9.52 + 0.09596V + (0.000103 + 0.00000229L)V^2 \quad (300\text{계}) \quad (3)$$

$$D(\text{kN}) = 8.80 + 0.00886V + 0.000867V^2 \quad (700\text{계}) \quad (4)$$

L: 열차길이, V: 속도(km/h)

동력분산식 HEMU-430X의 시험결과와 비교하기 위해서, 식(2)~(4)를 HEMU-430X의 제원에 대해 도출하면 순서대로 다음과 같이 나타난다.

$$\text{식(2)에서 } D(\text{kN}) = 2.11 + 0.02496V + 0.000436V^2 \quad (5)$$

$$\text{식(3)에서 } D(\text{kN}) = 4.13 + 0.04158V + 0.000442V^2 \quad (6)$$

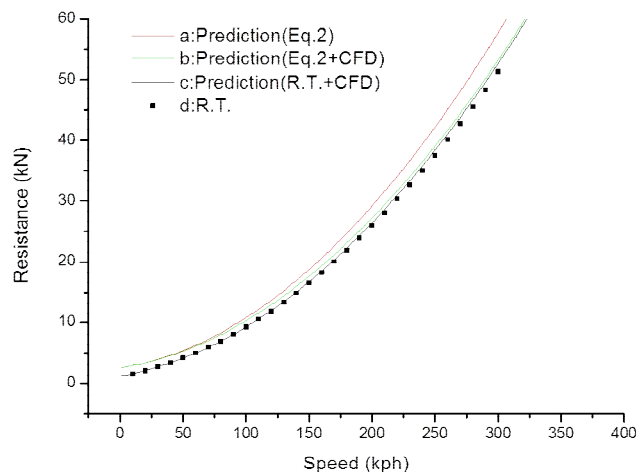


Fig. 1 Comparison of resistance of KTX-Sanchon between results by a resistance formula and running test

$$A \text{와 } B \text{는 식(4) 그리고 } C \text{는 식(3)에서 } D(kN) = 4.15 + 0.00416V + 0.000442V^2 \quad (7)$$

상기 식들과 CFD, 그리고 시험결과를 조합하여 만든 예측식을 Fig. 2에 도시하였다. 우선, CFD결과인 j의 경우, 시험결과 k와 잘 일치한다. 이를 기반으로 e를 살펴보면, 식(2)가 동력집중식 차량에 대한 식에도 불구하고 300 km/h 이하에서 다소 차이가 있을 뿐 대체로 잘 맞는 편이다. 하지만, 이는 h와 비교하면 시험결과와 오차가 커지는 것을 알 수 있는데, 이는 식(2)를 HEMU-430X 제원으로 적용할 때, 우연의 일치로 2차항의 값이 작게 나타났기 때문으로 판단된다. 특히, 식 (6)과 식(7)을 비교하면, B의 값이 차원이 다르게 나타난다. 하지만, HEMU-430X 시험값과 비교하면, 식(7)이 보다 잘 일치한다. 이에 대한 원인은 보다 면밀히 검토해 볼 필요가 있다. 정리하면, 식(5)의 A값 그리고 식(7)의 B값이 시험결과와 잘 일치한다. 여기서, C의 값을 CFD를 이용하여 구하면, 동력분산식 열차에 활용가능 할 것으로 예상된다.

동력분산식 열차에 적용가능한 주행저항식 도출을 위해 A,B,C 값을 구할 수 있는 조합에 대한 그래프를 Fig.3에 도시하였다. 분산형 고속열차의 길이와 무게만 제시되면 구할 수 있는 식에 대한 그래프는 1이다. 하지만, 전반적으로 시험결과 보다 낮게 예측하여, 300 km/h 이상에서는 큰 오차가 발생한다. 반면, CFD 결과를 활용한 m은 시험결과와 잘 일치한다. 따라서, 분산형 고속열차 주행저항식을 만들기 위한 가장 이상적인 방법은 식(2)와 식(4)를 이용해 각각 A와 B를 도출하고, CFD를 이용하여 C를 구하는 것이다. 하지만, 자세한 형상이 결정되지 전 단계에서는 C값을 식(3)의 2차계수식을 이용하여 구할 수 있으나, 계수에 대해서는 차량의 특성에 맞는 정확한 계수 도출을 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

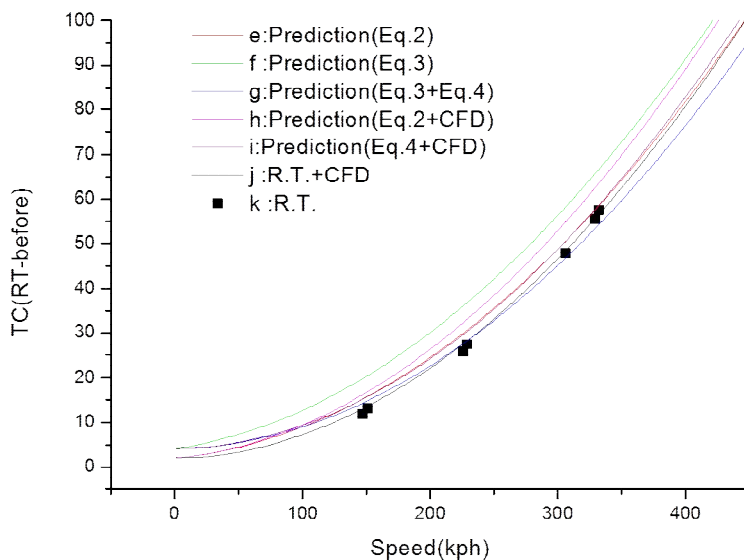


Fig. 2 Comparison of resistance of HEMU-430X between results by a resistance formula and running test

3. 결론

프랑스와 일본에서 제안된 고속열차 주행저항 일반식을 이용하여, KTX산천과 HEMU-430X을 대상으로 주행저항식을 만들었다. 그리고 각 식을 통해 도출된 주행저항을 시험결과와 비교하였다. 두 일반식 모두 시험결과와 오차가 다소 크게 발생하지만, 추력제원을 결정하기 위한 시스템 설계단계에서 약간의 수정을 통해 활용가능 할 것으로 판단된다. 하지만, 보다 정밀한 주행저항식을 도출하기 위해서는 주행저항 일반식과 CFD 결과를 같이 활용해야 한다. 그리고 우리나라 고유의 주행저항 일반식 개발을 위한 연구가 추진되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부의 ‘430kph급 고속열차 시운전 시험 연구’의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

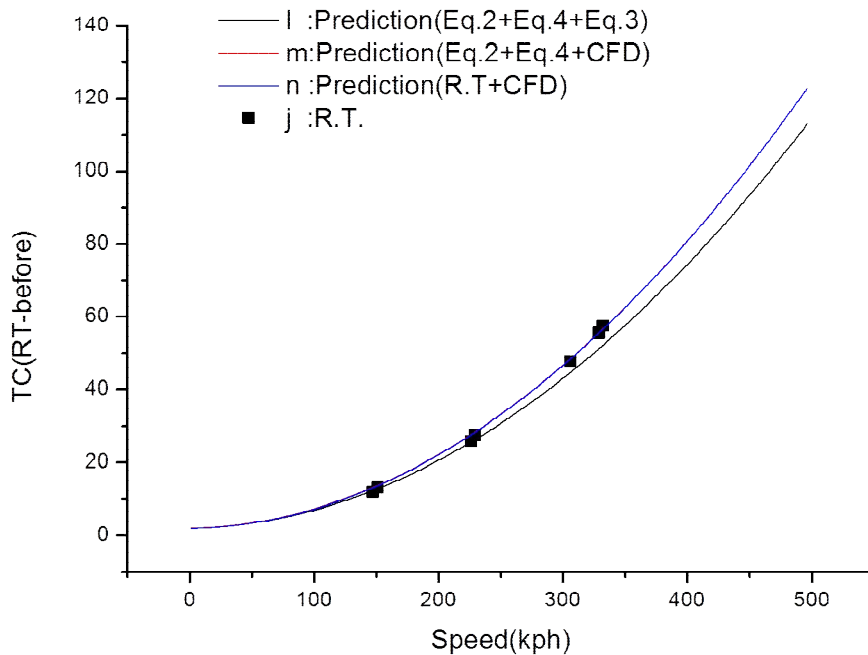


Fig. 3 Validation of a composed resistance formula for a multiple power high-speed train

- [1] S.W. Nam, S.H. Yun (2014) A Study on the Equation of Running Resistance for Honam High Speed Train, *Proceeding of KSR 2014 fall conference*, pp. 208-211.
- [2] G.B. Park, (2012) Engineering of high-speed railway system.