철도차량의 주행저항에 관한 연구

A Study on Running Resistance of Rolling Stock

김응천[†]이재안^{*} Kim, Eung-Cheon Lee, Jae-An 이하희** Lee, Ha-Hee

ABSTRACT

Republic of korea has begun operating high speed train service according as KTX service operation starts in 2004. Also, EMU whose maximum speed is over 150 kph will be starting to service with electrification and improvement of existing railroad. Moreover, metropolitan electric railways have begun an express service to increase scheduled speed. Therefore, running resistance of rolling stock becomes more important factor effects on the performance.

Running resistance of rolling stock is the factor which is necessary for the performance or operation plan of rolling stock, and it's related to rolling friction, slip friction, drag force, gradient, acceleration, curvature, tunnel condition and so on. It is possible to be calculated by CFD (Computational Fluid Dynamics). However it is predicted by experimental equation from running resistance test because of the complex calculation and manifold variables.

In this paper, studies about running resistance of rolling stock is introduced, and each term of experimental equation is studied through theoretical approximation. Also, running resistance of rolling stock is estimated by the result of running resistance test, and effects being related to friction, drag force, gradient is examined.

[†] 책임저자 : 비회원, 현대로템, 제품개발1팀, 연구원 E-mail : kec@hyundai-rotem.co.kr TEL : (031)460-1972 FAX : (031)460-1789

^{*} 비회원, 현대로템, 제품개발1팀, 주임연구원

^{**} 비회원, 현대로템, 제품개발1팀, 책임연구원

1. Introduction

1.1 연구의 배경

2004년 한국에 KTX 고속열차가 개통이 되면서, 대한민국은 본격적인 고속열차 시대에 들어서게 되었다. 또한, 기존 선로가 전철화가 되고 선로 조건이 개량됨에 따라 시속 150 km/h 이상의 고속 전기동차가 기존 간선형 열차를 대체하여 운행하고 있다. 광역전철 역 시 표정속도를 높이기 위해 급행 열차를 운행하고 있으며, 신설되는 광역 전철 역시 고속 의 성능을 점차 요구하는 추세로 가고 있는 실정이다. 열차가 고속화 되면서 주행저항은 열차 성능을 결정하는데 더욱 중요한 요소가 되었다.

열차의 주행저항은 열차의 성능계산이나 운행계획에 필요한 항목으로 일반적으로 구름마 찰이나 미끄럼마찰, 공기에 의한 항력, 선로의 구배조건, 가속도, 곡선반경, 터널 등에 따라 결정된다. 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 방법에 의해 열차의 주행 저항을 계산하는 것이 가능 하지만 실제로는 계산이 복잡하고, 고려해야 할 변수들이 많아 주행저항 시험을 통한 실험식으로 예측하고 있다.

본 논문에서는 현재까지 열차의 주행저항에 대해 연구된 현황을 간략히 소개 하였으며, 흔히 잘 알려진 주행저항식의 각 항에 대해 간략히 이론적으로 접근하여 물리적 의미를 살 펴 보았다. 또한, 전기동차의 주행저항을 예측하는 몇 개의 실험식으로 저항 값을 예측 하 고, 실제 전기동차의 주행저항 시험 결과를 통해 마찰력, 항력, 구배 조건 등이 주행저항에 미치는 영향을 검토 하였다.

1.2 주행저항식 소개

흔히 Davis equation 이라 불리는 주행저항식은 아래와 같이 상수항, 속도에 비례하는 항, 속도의 제곱에 비례하는 항의 합으로 구성된다.

 $R = a + b V + c V^2 (N)$

(1.1)

여기서, a, b, c는 각각 (N), (N·s/m), (N·s²/m²)의 차원을 가지는 상수이다.

열차의 주행저항은 위의 세 가지 항에 의한 주행저항 외에 가속도, 구배, 곡선 등에서의 주행저항을 극복해야 하는데 이는 주행저항 보정식에 의해 보정을 할 수 있다.

프랑스 철도 SCNF는 각각의 경우에 따라 아래 Table.1과 같은 식을 제시하고 있다.

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	주행저항식			
Bogie로 된 여객객차	$R = 0.015 + 0.000036 V^2$			
UIC 형식의 차량	$R = 0.0125 + 0.000021 V^2$			
2~3축의 여객차량, 고속화물열차	$R = 0.015 + 0.000054 V^2$			
축중 10t의 화차	$R = 0.015 + 0.000081 V^2$			
축중 18t의 화차	$R = 0.012 + 0.0000324 V^2$			
디젤기관차, 전기기관차	R=0.0065L+0.13n+0.0036V+0.00388V ² L:기관차의 질량(t), n:축수, V:속도(m/s)			
TGV	$R = 25 + 1.188 V + 0.0703728 V^2$			
Table.1 (V: m/s)				

독일의 경우 화물열차와 혼합편성 여객열차에 대해서 Strahl식이 사용되고 도시간 열차 의 경우 주로 Sauthoff식이 사용되는데 이 식은 화물열차에 대해서도 사용될 수 있다. Strahl식은 단위 질량당 주행저항을 나타낸다(V:m/s)

$$r = 0.01[(1.5 - 2.5) + (0.007 + \frac{1}{m})(\frac{3.6 V}{10})^2] (N/kg)$$
(1.2)

여기서, m값은 열차의 종류에 따른 상수로 각각의 값은 아래 Table.2와 같다.

항 목	상수 값
4축 여객객차와 유사한 화차	m = 40
2축~3축 여객객차	m = 30
특급 parcel 열차의 화물이 적재된 화차	m = 25
빈 화물 화차	m = 10

Table.2

Sauthoff식의 경우 n개의 객차와 질량 Q(t)인 열차에 대해 단위 질량당 주행저항식은 다음과 같이 표현된다.(V=m/s)

$$r = [1.9 + 3.6b V + 0.0048 \frac{1}{Q} (n + 2.7) A (3.6 + 15)^2] (N/kg)$$
(1.3)

위의 식에서 A는 등가 면적이며, b는 상수로써, 4축 차량의 경우 0.0025, 3축 차량의 경 우 0.004, 2축 차량의 경우 0.007 이다.

일반적으로 국내 전동차에 쓰이는 주행저항식은 다음과 같다.

지하: $r = 1.867 + 0.0359 V + 0.000745 V^2$ (kgf/ton)

(1.4)

지상: $r = (1.65 + 0.024 V) W_m + (0.78 + 0.0028 V) W_t + [0.028 + 0.0078(n-1)] V^2 (kgf)$ (1.5) V는 속도(km/h), W_m은(M-car의 중량), W_t는(T-car의 중량), n은 편성당 차량수 이다.

1.3 연구내용 및 논문구성

본 논문에서는 여러 주행저항식의 기본 바탕이 되는 Davis equation의 각항의 의미를 이론적으로 살펴 보았으며, 1.2절에 소개 되었던 전기기관차의 주행저항식을 이용, 이론적 으로 지상구간에서 주행하는 전동차의 주행저항을 시간에 대한 거리, 속도의 함수로 나타 내어, 실제 전기동차의 주행저항 시험 결과와 비교를 한 후, 이론값과 실험값의 오차에 대 해 분석 및 고찰을 하였다..

2. Research Methods

2.1 Davis equation

주행저항식의 기본 바탕이 되는 Davis equation(1.1)은 상수항인 첫 번째 항과 속도에 비례하는 항인 두 번째 항, 속도의 제곱에 비례하는 세 번째항 이 3가지 항의 합으로 이루어 져 있다. Davis equation(1.1)은 Figure.1과 같이 첫 번째 두 번째 항의 합인 구름저항 (Rolling resistance)과 세 번째 항인 공기의 항력(Drag force) 두 가지 힘의 합으로 나타낸 다. 곡선, 구배조건 역시 고려대상이 있으나 평탄선로에 구배가 없는 조건을 기본으로 한다.



Figure.1 Drag reduction of a tractor-trailer car

구름저항(Rolling resistance)의 경우 아래 식(2.1)와 같이 나타낸다.

$$R_{rolling} = f_{rolling} W(N) \tag{2.1}$$

여기서 W는 열차의 질량(N), *f*_{rolling}의 경우 구름마찰 계수로 이는 Figure.1과 아래 식 (1.6)에서와 같이 열차의 바람에 대한 상대속도(Relative velocity)에 비례하여 변한다.

$$f_{rolling} = f_{rolling} \left(1 + \frac{V}{k}\right) (k : \text{constant})$$
(2.2)

공기의 흐름에 의한 항력(Drag force)는 아래 식(1.6)과 같이 나타내며,

$$R_{drag} = \frac{1}{2} \rho C_D V^2 A \,(\mathrm{N}) \tag{2.3}$$

ρ는 공기의 밀도, A는 characteristic area로 열차의 geometry에 관계 된다. A는 크게 Frontal area, Planform area, 선박 등에서 쓰이는 Wetted area로 볼 수 있으며, 철도차 량의 경우 일반적으로 전두부의 단면적(Frontal area)의 값을 쓴다.

C_D의 경우 항력계수(Drag force coefficient)로, 열차의 형상에 따라 달라지며 geometry에 따른 C_D값을 Figure.2에 나타내었다.



Figure.2 Drag coefficient of Two-dimensional bodies

따라서, 전체 주행저항은 아래 식(2.4)과 같이 나타내며,

$$R_{total} = R_{rolling} + R_{drag} = f_{rolling} \left(1 + \frac{V}{k}\right) W + \frac{1}{2} \rho C_D A V^2 (N)$$
(2.4)

이는 Davis equation과 같은 꼴(2.5)로 표현 할 수 있다.

$$R = f_{rolling} W + \frac{f_{rolling} W}{k} V + \frac{1}{2} \rho C_D A V^2(N)$$
(2.5)

2.2 주행저항식의 이론적 풀이

Davis equation을 바탕으로 하는 주행저항식은 일반적으로 아래 식(2.6)과 같다.

R=-(av²+bv+c)(N)(* "-"는 진행 방향과 반대방향)
 (2.6)
 단위 질량당 주행저항은(W: [N]),

$$r = \frac{R}{W} = \frac{1}{g} \frac{dv}{dt} = -\left(\frac{a}{W}v^2 + \frac{b}{W}v + \frac{c}{W}\right)$$
(2.7)

초속 $v_o(m/s)$ 에서 타행으로 주행 한 후, 종단속도 V에 도달하는 시점의 시간을 t라고 하면 $\frac{dv}{dt} = -\left(\frac{ag}{W}v^2 + \frac{bg}{W}v + \frac{cg}{W}\right) (m/s^2),$ $\frac{ag}{1000W} = k, \frac{bg}{1000W} = m, \frac{cg}{1000W} = l \notin S \oplus \mathcal{B},$ $\frac{dv}{-(kv^2 + mv + l)} = dt,$ $\int_0^t dt = -\int_{v_o}^v \frac{1}{kv^2 + mv + l} dv$ $= \int_{v_o}^{v_o} \frac{1}{kv^2 + mv + l} = \frac{2}{\sqrt{4kl - m^2}} \left(\arctan\frac{2kv + m}{\sqrt{4kl - m^2}} - \arctan\frac{2kv + m}{\sqrt{4kl - m^2}}\right)$

 $\frac{1}{\sqrt{4kl-m^2}} = C \quad (*C=constant) 로 놓으면, running time(t)는 아래 식(2.8) 과 같이 정 리된다.$

$$t = 2C(\arctan C(2kv_o + m) - \arctan C(2kv + m))(s)$$
(2.8)
주행거리(s)는,

$$\begin{split} \arctan C(2kv+m) &= \arctan C(2kv_o+m) - \frac{t}{2C}, \\ C(2kv+m) &= \tan \Bigl(\arctan C(2kv_o+m) - \frac{t}{2C} \Bigr) \\ \text{따라서,} \end{split}$$

$$v = \frac{\frac{1}{C} \tan\left(\arctan C(2kv_o + m) - \frac{t}{2C}\right) - m}{2k}$$
(2.9)

ds = vdt,

$$\begin{split} \int_0^s ds &= \int_0^t v dt = \int_0^t (\frac{\frac{1}{C} tan(\arctan C(2kv_o + m) - \frac{t}{2C}) - m}{2k}) dt \\ s &= \frac{1}{k} \ln \left| \sec(\arctan C(2kv_o + m) - \frac{t}{2C}) \right| - \frac{m}{2k} t - \frac{1}{k} \ln \left| \sec(\arctan C(2kv_o + m)) \right| \\ \end{split}$$

정리하면 아래 식(2.9)과 같다.

$$s = \frac{1}{k} \ln \left| \frac{\sec(\arctan C(2kv_o + m) - \frac{t}{2c})}{\sec(\arctan C(2kv_o + m))} \right| - \frac{m}{2k}t \text{ (m)}$$
(2.10)

초속도 Vo에서 V까지의 평균 주행저항은 다음과 같다.

$$R_{average} = \frac{\int_{v}^{vo} (av^2 + bv + c)dv}{v_o - v} = \frac{\frac{a}{3}(v_o^3 - v^3) + \frac{b}{2}(v_o^2 - v^2) + c(v_o - v)}{v_o - v}$$
(N) (2.11)

구배가 있는 선로나, 곡선 선로 조건에서는 주행저항을 보정 해주어야 하는데 상구배 (G ‰) 조건에서의 구배에 의한 주행저항은

$$R_{gradient} = mg\sin\left(\arctan\frac{G}{1000}\right)(N) \tag{2.12}$$

이며, 이는 속도(V)에 independent 한 항으로 상수항 이다.

곡선반경(p m)인 선로에서 역시 주행저항 값을 보정 해주어야 한다. 곡선반경에 의한 주행저항은,

$$R_{curvature} = mg \frac{700}{\rho} \,(\mathrm{N}) \tag{2.13}$$

이며, R_{curvature} 값 역시 속도(V)에 independent 한 항으로, 상수항이다.

2.3 주행저항 시험 및 결과측정 방법

전동차의 주행저항시험은 구간 내 가능한 최고속도에서 타행(Notch off)으로 일정 단위 로 속도를 측정한다. 초기 속도에서 목표 속도 까지 도달 되는데 소요되는 시간을 통해 평 균 감속도를 측정 한 후, 열차의 질량을 곱하여 평균 주행저항을 측정후 속도와 주행저항 과의 관계를 Graph를 plotting 한다. 그 후, 주행저항(r)과 속도(v)의 관계를 통해 오차의 원인을 분석, 고찰 하였다.

전동차 주행저항 시험은 국내전동차에서 사용되는 경험식인 (1.4)식을 이용하였으며, 주 행저항 시험 결과는 부산지하철 3호선 전동차의 지상, 지하구간의 주행저항 시험 결과를 이 용하였다. 구배조건은 10 ‰의 구배 조건을 적용 하였으며, 직선 선로에서 시험을 하였다.

3. Results

3.1 결과 그래프



Figure.3 지하구간 Time-Velocity



Figure.4 지상구간 Time-Velocity



Figure.5 지하구간 Time-Distance



Figure.6 지상구간 Time-Distance



Figure.7 구배조건을 보정한 Velocity - Running resistance(지하구간)



Figure.8 구배조건을 보정한 Velocity - Running resistance(지상구간)

3.2 결과 분석

4 회의 지하구간에서의 주행저항 시험 결과(Figure.9)를 보았을 때 전체적으로 이론값과 결과값의 오차가 약 60 km/h의 범위까지 일정 하였고, 60 km/h 이상의 범위 내에서는 이 론 값에 비해 오차가 증가하였다. 국내전동차에 사용되는 지하구간식이 중량과 무관하게 일 정한 경험식이 사용되어, 중량에 dependent한 지하구간 주행저항식(1.5)이 중형 전동차에 적용 되었을 때 상수항과 일차항의 오차를 초래 한다. 아래 Table.3에 대형전동차인 서울메 트로 2호선과 부산지하철 3호선의 중량을 나타내었다.



Figure.9 지하구간 주행저항 시험결과

항 목	Μ'	Tc1	Tc2		
서울메트로 2호선	58.9	55.8	55.7		
부산지하철 3호선	51.9	47.4	47.5		

2M2T 편성의 부산 지하철 3호선의 경우 같은 편성의 서울메트로 2호선 전동차에 비해 만차 중량이 편성당 30.6 ton이 가볍다. 따라서 중형 전동차일 경우 대형 전동차에 비해 편 성당 중량이 약 13.3 %가 가볍고 그에 맞게 주행저항식의 상수항과 일차항의 계수를 보정 하면 식 1.4에서 상수항은 1.619, 일차항의 계수는 0.0311로 보정된다.

상수항과 일차항 계수를 보정 후 수정된 이론 값과 결과 값은 Figure.10과 같다.



Figure.10 상수항, 일차항 계수 보정후 Velocity-Running resistance graph

중량 차이를 보정했음에도 오차는 거의 줄어들지 않았으며, 오히려 측정 값이 속도와 항 릭(Drag force)와의 관계를 나타내는 값과 많은 차이를 보이지 않았다. 즉 실제 주행저항 시험에서는 구름 저항(Rolling resistance)이 거의 작용하지 않았다는 결과를 보이고 있다. 구름 저항(Rolling resistance)의 감소의 원인으로는 복합적인 요인이 있지만, 실제 시험구 간에서의 선로의 구배 및 곡선조건의 부정확성이 가장 큰 원인으로 꼽을 수 있으며, 선로와 열차의 마찰계수 등 선로 조건의 영향도 관계가 있다. 또한, 공기에 의한 항력(Drag force) 에 의한 주행 저항 값이 이론적인 예측 값에 비해 측정 값이 작게 나온 것은 한국형 표준 전동차 모델을 기반으로 한 유선형 형태의 부산지하철 3호선의 형상(Figure.11)이 공기의 항력에 의한 주행저항 값을 감소 시켰다고 볼 수 있다.

반면, 지상구간의 경우 4회의 실험결과(Figure.12)에서 보듯이 구름 저항(Rolling resistance)이 작게 나왔으나, 항력(Drag force)의 경우 상행 구간에서의 시험의 경우 이 론 값 보다 크게 나왔으며, 하행 구간에서 시험 했을 경우 이론 값에 비해 작게 나왔다. 지 상구간 시험의 경우 바람 등 외부 환경 조건에 영향을 많이 받는 시험이기 때문에 바람에 대한 열차의 상대속도로 계산을 하여야 한다. 그러나, 바람의 경우 방향과 풍속 예측이 힘 들기 때문에 오차가 생길 수 있다. 상행 구간과 하행구간의 상이한 결과에서 보듯이 상행 구간에서는 열차의 뒤쪽에서 진행 방향 으로의 바람이 불었으며, 하행구간에서는 열차가 진 행하는 방향과 반대 방향으로의 바람이 불었을 가능성이 있다. 또한, 선로의 구배, 곡선조건 의 불확실성 역시 오차의 원인으로 볼 수 있다.



Figure.11 유선형 전두부의 부산지하철 3호선(좌측)



Figure.12 지상구간 주행저항 시험결과

4. Conclusion

철도차량의 주행저항의 예측을 정확히 하기란 불가능하다. 주행저항에 관련된 변수들이 다양하고 복잡하며, 그 변수들을 전부 예측하고 제어하기란 힘들다. 선로 조건에 따라 마 찰 계수가 변하며, 바람의 방향 및 세기 등 역시 정확히 예측하기 불가능 하다. 하지만 무 엇보다 중요한 것은, 실제 전동차가 운행하는 구간에서 일정한 구배조건의 시험선로를 확 보가지가 매우 어렵기에 정확한 주행저항을 예측 하기가 매우 까다롭다. 정확한 주행저항 식을 산출하기 위해서는 차량과 레일간의 정확한 마찰계수를 선정해야 하며, 고속으로 운 행되는 열차의 경우 형상에 따른 정확한 항력계수(Drag coefficient) 값을 선정하는 것 역 시 중요하다. 지상구간에서 운행되는 열차의 경우 바람의 영향을 최소화 할 수 있는 조건 에서 시험을 진행해야 한다. 80 km/h 이하의 구간에서 진행된 시험에서 속도에 대한 주행 저항 값이 이론 값과 측정 값 모두 거의 Linear한 분포를 보였다. 이는, Figure.11에서 보 듯이 저속으로 운행하는 열차에서는 공기에 의한 항력(Drag force)에 비해 구름 저항 (Rolling resistance)값이 우세 하며, 열차의 주행저항을 예측하는 데 가장 중요한 요소임 을 알 수 있다. 반면에 80 km/h 이상의 구간에서는 항력(Drag force)에 의한 힘이 우세 하게 된다. 따라서 향후 고속으로 운행되는 전동차에서는 항력계수(Drag coefficient)의 값을 낮추기 위한 전두부 형상 설계가 주행저항을 낮추는데 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 주행저항식의 이론적 의미를 살펴 보았으며 실제 철도차량의 주행저항 시 험 결과를 토대로 주행저항의 이론 값 과의 비교 및 주행저항에 영향을 주는 Factor들을 고찰한데 의의를 둔다. 또한, 다양하고 복잡한 변수들로 인해 정확한 주행저항 값을 예측 하는데 있어서 한계를 명시하는 계기가 되었으며, 주행저항 시험 결과에서 나타난 오차 값 의 세부적인 분석은 향후 연구에서 다루어 보고자 한다.

5. Reference

- 1. Frank M.White, *Fluid mechanics*, fourth edition, pp 451 \sim 476
- 2. 구병춘, 열차 주행저항에 관한 연구동향
- 3. http://mech.andong.ac.kr/~nvsa/file/vehicle/chap4.pdf