

디젤전기기관차의 공압제동 영향인자 및 특성 분석

최돈범*, 김민수
한국철도기술연구원

Analysis of pneumatic braking component effects and characteristics of a diesel electric locomotive

Don Bum Choi*, Min-Soo Kim
Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구에서는 국내 화물 및 여객차량들을 견인하는 디젤전기 기관차의 제동에 따른 동적 거동을 분석하기 위하여 제동장치에 영향을 미치는 마찰계수, 제동압력, 주행저항 등을 시험하였다. 마찰계수는 UIC 541-4를 참고로 Dynamo 시험을 수행하였으며 시험결과는 다변량 회귀분석을 통해 제동하중, 제동초기 속도와의 관계를 분석하여 제시하였다. 제동압력은 상용제동과 비상제동으로 구분하였으며, 제동밸브와 배관의 특성을 반영하기 위하여 시간에 따른 제동압력 변화를 대상 차량에서 측정하였다. 차량에 작용하는 외력을 반영하기 위하여 EN 14067-4의 타행시험을 수행하고 2차 다항식 형태의 주행저항을 제시하였다. 도출한 주행저항을 동일 차종에 대하여 각 국가별로 사용하고 있는 주행저항들과 비교하였다. 차량의 제원, 마찰계수, 제동압력, 주행저항을 바탕으로 직선 평탄 선로를 주행하는 디젤전기기관차의 동적 거동을 EN 14531-1에서 제시된 시간적분을 이용하여 해석하였다. 해석 결과는 상용제동과 비상제동에 대하여 각각 차량의 속도이력 시험결과와 비교 검증하였으며 상당히 합리적인 결과를 도출하였다. 본 연구의 결과들은 철도차량들을 연결하여 운행하는 열차의 동적 거동 해석에 활용할 수 있을 뿐 아니라 차량 설계에서 제동에 영향을 미치는 다양한 파라미터들을 분석하고 성능향상의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract This paper deals with the braking dynamic behavior of diesel electric locomotive pulling domestic cargo and passenger vehicles. Friction coefficient, pneumatic pressure, and running resistance affecting the braking system were tested. For the friction coefficient, the Dynamo test was performed with reference to UIC 541-4. The results are analyzed by multivariate regression and the relationship between braking force and initial velocity is presented. The pneumatic pressure were classified into service braking and emergency braking. In order to reflect the characteristics of the brake valve and piping, the pressure rising over time was measured in the vehicle. In order to reflect the external force acting on the vehicle, we carried out the test of EN 14067-4 and presented the second order polynomial formula on a running resistance. The running resistance test results were compared with other countries. The dynamic behavior of a diesel electric locomotive running on a straight flat track based on vehicle resources, friction coefficient, braking pressure, and running resistance is simulated using the time integration presented in EN 14531-1. The simulation results were compared and verified with the vehicle braking test results. The results of this study can be used to analyze the dynamic braking behavior of a train. Also, it is expected that various parameters affecting braking in vehicle design can be analyzed and used as basic data for braking performance improvement.

Keywords : brake equipment, diesel electric locomotive, dynamic behavior, friction coefficient, running resistance

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Don Bum Choi(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5563 email: eye@krii.re.kr

Received August 30, 2018

Revised September 31, 2018

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018

1. 서론

주행속도의 증가와 운영환경 변화에 따라 철도차량의 운행 안전에 큰 영향을 미치는 제동장치의 설계와 그 성능 확인에 대한 중요성은 더욱 강조되고 있다.

특히 최근에는 남북 화물열차의 운행 가능성과 함께 기존보다 2배 이상 많은 차량을 연결하여 운행하는 장대 화물열차의 운영 필요성이 제기되면서 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 화물열차는 제동신호가 공압으로 전달되기 때문에 이로 인한 차량간 제동지연시간에 실험적 연구[1, 2]와 제동 지연시 연결기에 발생하는 충격력에 관한 연구[3] 등이 대표적이라 할 수 있다.

화물열차는 Fig. 1에서와 같이 열차를 구성하는 차량들 중 견인력을 발생시키는 기관차가 동력이 없는 차량들을 견인하는 동력 집중식으로 운영되기 때문에 기관차는 다른 차량들에 비해 무겁고 가장 큰 제동력을 발휘하지만 기존의 철도차량 제동 및 동역학 해석 연구에서는 기관차의 제동특성이 다른 화차들과 동등한 제동 감속도를 갖고 있다고 가정하여 해석하거나 제동압력 특성만 연구되어 기관차가 열차 제동시 미치는 영향을 정확히 알 수 없는 한계를 갖는다.

국내 철도차량 제동시스템 설계는 구성 요소장치의 특성 파악이 어렵기 때문에 주로 실차 시험과 운영 경험을 이용한 보정 방식을 이용하여 설계하며 이를 검증하고 있다. 이러한 설계 방법은 실차 운영을 통해 비교적 정확한 감속도 및 제동거리를 확인할 수 있지만, 제동시스템을 구성하는 중요 장치가 제동거리 등에 미치는 영향을 알 수 없으며 설계 변경이 어렵다는 단점을 갖고 있다.

제동특성을 분석하고 제동에 따른 열차의 위치, 속도를 예측하기 위한 수치해석적 방법에 관한 연구들도 수행[4~7]되었으나 운영되는 실제 차량에 적용한 사례는 매우 드물다.

본 연구에서는 국내에서 2014년 제작되어 운영하고 있는 디젤전기기관차의 제동시스템의 제원을 기초로 사용하고, 제동특성에 큰 영향을 미치는 제동 마찰계수와 제동공기 압력의 변화를 각각 Dynamo 시험과 실차 시험의 결과를 수치해석의 입력자료로 적용하였다. 이 때 마찰계수는 다변량 회귀분석을 통해 제동력과 제동초기 속도의 영향을 고려하였다. 끝으로 해석결과를 실차 제동시험과 비교하여 검증하였다.

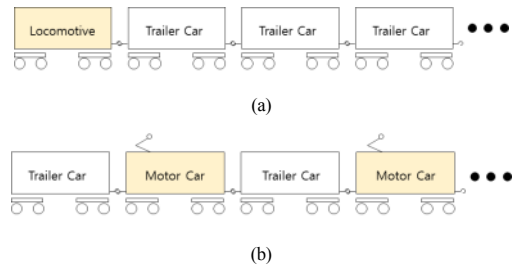


Fig. 1. Train formulaiton of (a) single power unit train and (b) multiple power train

2. 본론

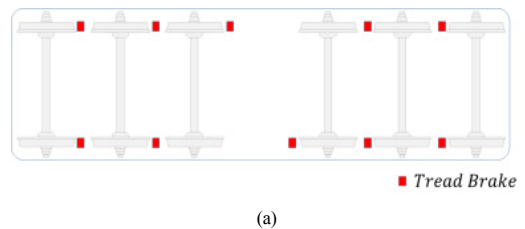
2.1 적용차량의 제원

디젤전기기관차는 디젤엔진을 이용하여 발전기를 가동하고 발생된 전기를 통해 모터를 구동하는 방식으로 차량 중량이 무겁기 때문에 선로의 허용중량을 고려하여 차축은 6개로 구성되어 있다. 차량의 주요 제원은 Table 1과 같다.

운행시 사용하는 공기 제동장치는 철도차량에서 오랫동안 사용되어온 방법으로 압축 공기가 제동밸브(brake valve)를 통해 제동실린더로 공급되며 제동패드(brake pad)가 차륜에 마찰력이 작용하도록 총 10개로 구성되어 있다 (Fig. 2).

Table 1. Disel-electro locomotive specification

Length	22 [m]
Width	2.87 [m]
Height	4.15 [m]
Weight	132000 [kg]
Power	3,688 [hp]
Max. velocity	165 [km/h]



(a)

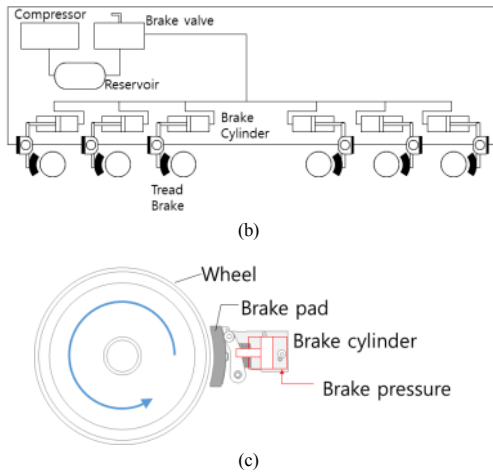


Fig. 2. Locomotive pneumatic brake system

기관차에 작용하는 전체 제동력은 작용하는 압력과 수량에 따라 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_B = \mu P A_{cylinder} N r \quad (1)$$

여기서, μ 는 마찰계수, P 는 제동압력, $A_{cylinder}$ 는 제동 실린더의 면적, N 은 차량에 설치된 제동 실린더 수량, r 은 기계적 구조에 의한 증폭비를 각각 나타낸다. 이 중 마찰계수와 제동실린더 압력을 제외하고는 일정하다고 가정하였다.

Table 2. Tread brake system

Brake Cylinder Diameter [m]	0.254
Brake Cylinder Area [m ²]	0.051
Cylinder Quantity, N	10
Rigging ratio, r	2

2.2 마찰계수의 영향

일반적으로 마찰계수는 재료특성에 따라 다르기 때문에 일률적으로 적용할 수 없다. 본 연구에서는 철도차량의 합성 제동패드들의 시험 조건을 제시하고 있는 국제 규격 UIC 541-4를 적용[9]하여 제동시험기 (Fig. 3)를 제동마찰계 시험을 수행하였다.



Fig. 3. Dynamo test bench

제동 초기속도는 50, 80, 100, 120, 150, 165 km/h의 속도에서 제동하중이 15, 30, 40 kN으로 작용하는 조합 조건으로 각 2회 반복 시험하였다. 제동시험 프로그램은 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Dynamo test program

Initial velocity [km/h]	Braking force [kN]	brake pad temperature [°C]
50	15 30 40	50-60
80		
100		
120		
150		
165		

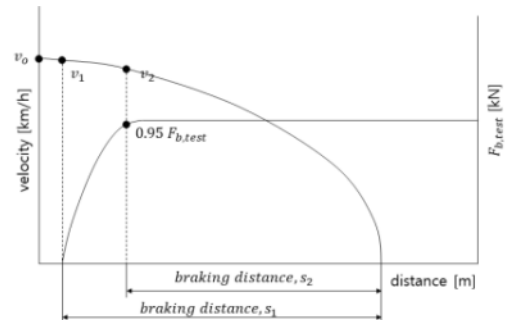


Fig. 4. UIC 541-4 test schematic diagram

UIC 541-4에 따른 평균 마찰계수(μ_m)는 식 (2), (3)과 같이 산출된다.

$$\mu_m = \frac{1}{s_2} \int_0^{s_2} \mu_a ds \quad (2)$$

$$\mu_a = \frac{F_t}{F_{b,test}} \quad (3)$$

여기서, s_2 는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 제동하중의 95%에 도달한 거리부터 정지할 때까지의 거리, 순간마찰계수(μ_a)는 차륜에 작용하는 제동하중($F_{b,test}$)과 순간 접선방향 하중(F_t)의 관계를 통해 알 수 있다 (Fig. 5).

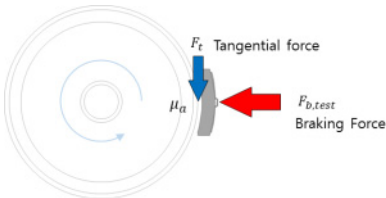


Fig. 5. Instantaneous friction coefficient relation

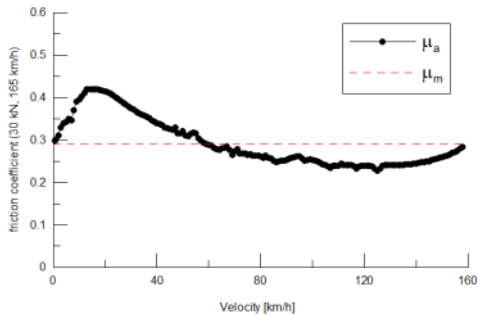


Fig. 6. Friction coefficient with 30 kN, initial velocity 165 km/h

차륜과 제동패드 사이의 마찰계수는 제동거리 예측과 승차감 측면에서 일정한 값을 갖는 것이 가장 우수하겠으나 실제로는 제동시 온도상승과 미세조직의 변화 등 제동패드의 재질 영향으로 일정하지 않기 때문(Fig. 6)에 일반적으로 제동설계에서는 평균 마찰계수를 사용한다.

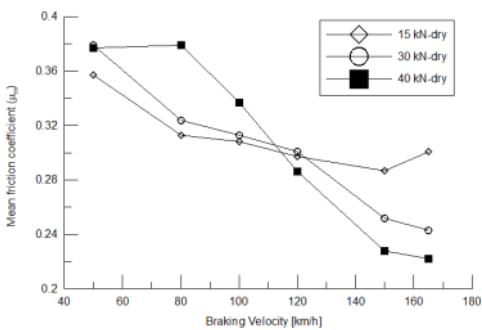


Fig. 7. Dynamo test results (mean friction coefficient)

Fig. 7은 디젤 전기기관차의 제동패드를 UIC 541-4에 따라 시험한 평균 마찰계수의 분포를 나타낸 것이다. 마찰계수는 0.22~0.38의 값을 갖고, 제동하중이 낮을수록 변화의 폭이 작았다. 또한, 제동초기 속도가 낮을수록 높은 마찰계수를 나타내었다. 이는 일반적인 합성제동패드 (composite brake pad)의 특징과 유사하다[8].

시험을 통해 도출된 마찰계수를 실제 차량에 적용하기 위해서는 실제 제동하중 및 속도에 따라 예측할 수 있어야 한다. 제동마찰계수의 상관관계를 분석하기 위하여 2차 함수형태의 다변량 회귀분석[9]을 수행하였다.

$$\mu_m = a_1 + a_2v + a_3F_{B,test} + a_4v^2 + a_5F_{B,test}^2 + a_6vF_{B,test} \quad (4)$$

95% 신뢰수준의 계수 값은 각각 $a_1=0.32355$, $a_2=-1.86E-05$, $a_3=0.00279$, $a_4=9.26E-07$, $a_5=3.40E-05$, $a_6=-4.40E-05$ 를 갖으며 Table 4에는 분산분석의 결과를 나타내고 Fig. 8에는 회귀분석 결과를 나타내었다.

Table 4. Analysis of variance results

	Sum of squares	Mean square	F	Prob.>F
Regression	1.721	0.287	1180.468	9.99E-16
Residual	0.003	2.43E-4		
Total	1.724			

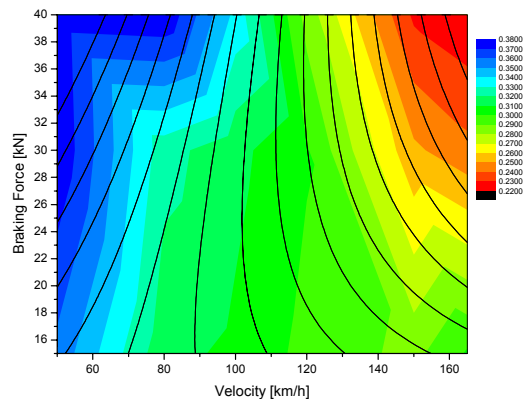


Fig. 8. Multivariate regression analysis results

2.3 제동압력의 영향

식(1)에서와 같이 제동압력은 제동력에 직접적으로 영향을 주는 요소로 앞서 언급한 바와 같이 제동밸브 및 배관의 특성에 따라 시간지연이 발생하기 때문에 일정하지 않아 등가시간 (equivalent time, t_e)을 이용하여 분석한다(Fig. 9, [10]).

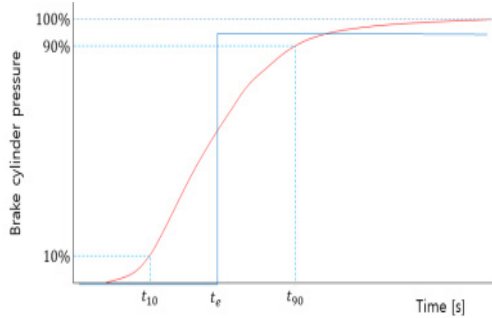


Fig. 9. Typical brake cylinder pressure rising

등가시간(t_e)은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, t_{10} 은 최대압력의 10%에 도달하는 시간, t_{90} 은 최대압력의 90%에 도달하는 시간을 각각 나타낸다.

$$t_e = t_{10} + (t_{90} - t_{10})/2 \quad (5)$$

본 연구에서는 정차상태에서 Fig. 2의 차량에 대하여 첫 번째 차축에 설치되어 있는 제동실린더의 제동 압력을 측정하였다. 제동은 평상시 차량 제동에 사용하는 상용제동(service brake)과 주행선로에 침입한 물체 등으로 긴급한 상황에서 체결하는 비상제동에 대하여 각각 수행하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 측정한지 1초가 경과한 시점부터 계단 제동신호가 인가되었을 때의 상용제동과 비상제동시의 제동실린더의 압력을 각각 나타낸다.

디젤전기기관차에서는 상용과 비상제동의 차이가 최고 압력의 변화가 있는 것이 아니라 압력상승 시간에 따른다.

시험결과를 EN 14531-1에 따른 등가시간 주요 인자를 분석하면 Table 5와 같다. 제동신호가 인가된 시간부터 최고압력의 10%까지 도달 시간(t_{10})을 제동지연 시간, 최고압력의 90%까지 소요 시간(t_{90})을 제동응답시간으로 적용하였다[10].

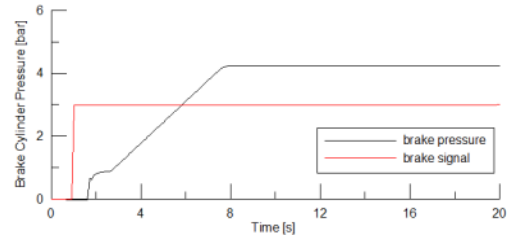


Fig. 9. Brake pressure with full service braking

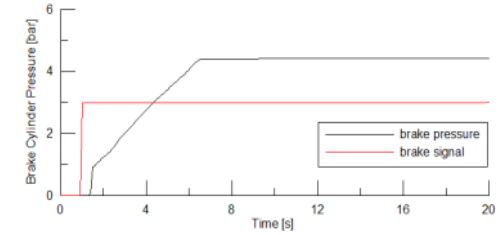


Fig. 10. Brake pressure with emergency braking

Table 5. Characteristics of service and emergency braking

Characteristic value	Service braking	Emergency braking
Delay time, t_{10} [s]	0.72	0.34
Equivalent time, t_e [s]	2.64	2.25
Response time, t_{90} [s]	6.00	4.84
Full brake time, t_{100} [s]	6.78	5.44
Max. Press.[bar]	4.38	4.38

2.4 디젤 전기기관차의 주행저항

움직이는 철도차량의 제동체결에 따른 제동거리를 계산하기 위해서는 제동력 뿐 아니라 식 (6)에서와 같이 외부에서 작용하는 힘을 고려할 수 있어야 한다. 주행하는 철도차량의 외력은 크게 나누어 주행저항과 선로 특성에 따른 저항 2가지로 구분할 수 있다[12].

$$M \frac{dv}{dt} = F_{braking} + F_{external} \quad (6)$$

주행저항은 철도차량이 직선평탄 선로를 주행할 때 철도차량의 기계적 저항과 공기역학적 항력 (drag force)을 말하며 속도에 따라 식 (7)과 같이 2차 다항식의 형태로 나타낸다.

$$F_R = (C_1 + C_2 v + C_3 v^2) M \quad (7)$$

여기서 C1, C2, C3는 주행저항 계수로 기계적 저항과 공기역학적 항력계수를 각각 나타내고, v는 차량의 주행 속도, M은 차량의 질량을 각각 나타낸다.

선로의 특성에 따른 저항은 철도차량이 주행하는 선로가 경사가 있거나 곡선인 경우는 평탄선로와 다른 추가적인 저항으로 작용하게 된다.

본 연구에서는 직선평탄선로에서의 제동력의 영향을 살피기 위한 것으로 선로의 특성에 따른 저항은 고려하지 않았다.

주행저항의 측정은 견인봉 (draw bar)시험 방법과 타행시험 방법 (coasting test)이 적용되고 있다[11, 12]. 견인봉 방법은 차량의 연결기에 하중 측정 장치를 설치하고 차량의 움직임에 따라 소요되는 힘을 측정하는 방식으로 주로 차량이 움직이기 시작할 때의 저항을 측정할 때 사용된다. 타행시험 방법은 직선 평탄 선로에서 일정 속도로 주행시킨 후 제동이나 동력을 사용하지 않는 타행 (coasting driving) 운전하면서 저항에 의해 움직임이 멈출 때까지 속도와 시간을 측정하여 소요되는 힘을 산출하는 방식이다[11~ 13].

본 연구에서는 철도차량의 공기역학적 특성을 분석하는 절차 및 분석 방법에 대한 규격인 EN 14067-4의 타행시험법에 따라 Fig. 11과 같이 차량에 타코미터를 설치하고 타행운전(Coast driving)하면서 속도를 계속하였다. 속도는 선로 허용 최고속도 (100 km/h)에서 정차할 때까지 시험하였으며 직선평탄 선로의 시험거리가 충분하지 않은 경우 반복시험을 통하여 정차할 때까지의 속도 정보를 확보하였다. 시험결과는 Fig. 12와 같다.



Fig. 11. Running resistance measurement setup

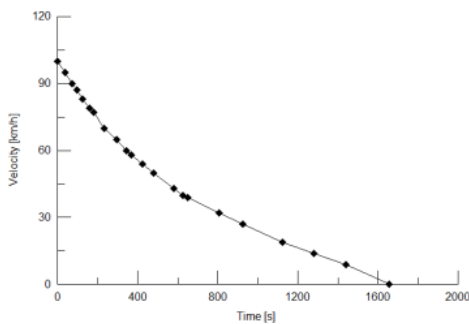


Fig. 12. Running resistance speed history result

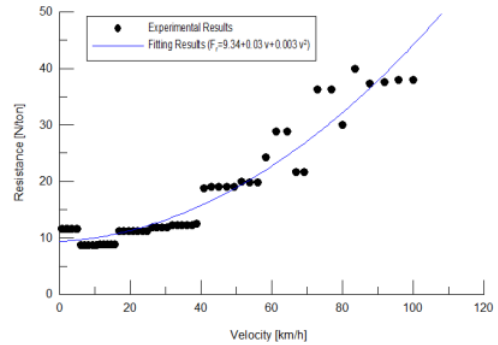


Fig. 13. Running resistance force with curve fitting results

Table 6. Locomotive running resistances

Country	Running resistance (N)
Korea	$F_R = (14.89 + 0.294 v + 0.0018 v^2) M$
USA	$F_R = (18.33 + 0.0509 v + 0.00239 v^2) M$
Russia	$F_R = (23.52 + 0.0883 v + 0.0034 v^2) M$

규격에 따라 속도이력을 저항력으로 환산하고 2차 다항식으로 회귀분석하면 식 (7)의 주행저항 계수 C1, C2, C3는 각각 9.3, 0.03, 0.003의 값을 갖게 된다. 저항력과 회귀분석의 결과는 Fig 13에 나타내었다.

디젤전기 기관차의 주행저항은 Table 6에 나타낸 바와 같이 국가 또는 운영기관별로 서로 다른 기준으로 제시되고 있다[14, 15]. 국내에서 제시된 디젤전기 기관차의 주행저항은 해당 차량의 재원을 반영한 환산 값으로 나타내었다.

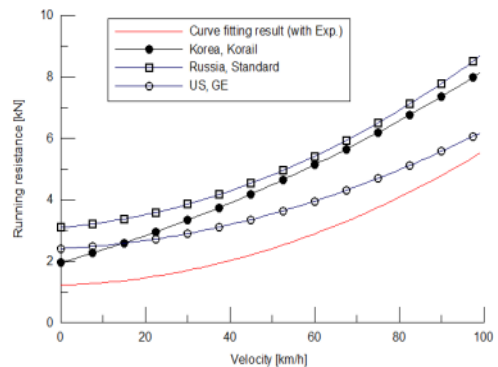


Fig. 14. Comparison of running resistance test results with other countries' standards

주행저항 기준들을 시험결과와 비교(Fig. 14)해 보면 본 연구의 주행저항 시험결과가 상대적으로 매우 낮은 것을 알 수 있다. 이는 제시된 주행저항 기준들이 차량 형상이나 베어링 등 차량에 적용된 장치의 특성을 반영할 수 없으며 주로 주행에 필요한 견인력을 추정하기 위해 보수적으로 제시한 결과로 보인다.

실제보다 큰 주행저항의 예측은 기관 및 전동기의 용량을 크게 설계할 수 있으며 차량이나 선로의 노후화 등을 반영할 수 있어 운영측면에서 안정적일 수 있지만 중량이 커져 운영 효율이 낮아지는 단점과 함께 제동장치 설계시 낮은 제동력을 요구하기 때문에 정확한 주행저항의 예측이 바람직하다.

2.5 시간 적분법에 따른 수치해석 및 검증

철도차량의 제동에 따른 정지거리 분석 방법을 제시하고 있는 EN 14531-1의 시간 적분법이 대표적이다[4, 10]. 본 연구에서는 Fig. 15와 같이 EN 14531-1의 해석 절차를 이용하고 부품 또는 실차 시험을 통해 확인된 마찰계수, 제동압력, 주행저항 등을 입력자료로 사용하였다.

EN 14531-1의 시간 적분 계산방법은 시간, $t = t_{j+1}$ 에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{속도} \quad & v_{j+1} = v_j - a_j \Delta t \\ \text{이동거리} \quad & s_{j+1} = s_j + v_j \Delta t - \frac{1}{2} a_j \Delta t^2 \\ \text{감속도} \quad & a_{j+1} = \frac{(F_B + F_R)_{j+1}}{M} \end{aligned}$$

여기서, j는 시간적분 구간 번호, Δt 는 시간간격, s는 이동거리, a는 감속도를 각각 나타낸다.

실차시험은 Fig. 11의 주행저항 시험과 같이 직선 평간선로에서 상용제동과 비상제동시 차륜에 설치된 타코미터를 이용해 차량의 속도를 측정하였다.

Fig. 16과 Fig. 17에 상용제동과 비상제동에 대하여 시간적분법을 이용한 시뮬레이션 결과와 실차 시험 결과를 비교하여 각각 나타내었으며 시뮬레이션 결과는 시험결과와 비교하여 매우 합리적으로 예측하고 있음을 알 수 있다.

실제 시험과 시뮬레이션 결과와의 차이를 비교하기 위하여 식 (8)의 무차원 속도와 시간을 사용하여 Fig. 18에 나타내었다. 여기서 V_{exp} 는 시험을 통한 측정된 속도, V_{sim} 은 시뮬레이션을 통해 계산한 속도, V_{max} 는 차

량 주행 최고속도, t는 시간, t_{max} 는 정차까지의 소요시간을 각각 나타낸다.

$$\begin{aligned} u^* &= \frac{abs(V_{exp} - V_{sim})}{V_{max}} \\ \tau^* &= \frac{t}{t_{max}} \end{aligned} \quad (8)$$

시뮬레이션과 실제시험간의 차이의 주요 원인은 마찰계수의 영향인 것으로 보인다. 시뮬레이션에서는 평균 마찰계수를 사용하지만, 실제 차량의 제동에서는 순간마찰계수가 작용하기 때문이다.

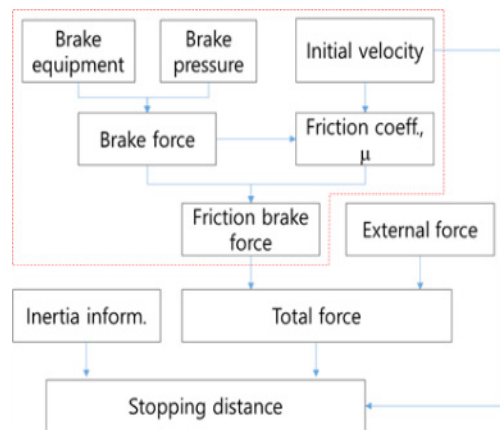


Fig. 15. Stopping distance calculation procedure

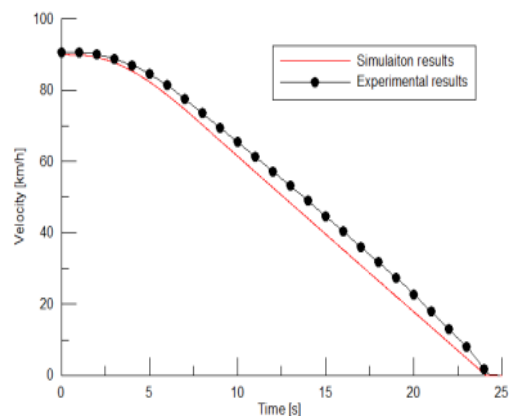


Fig. 16. Comparison of simulation and experimental results in full service braking

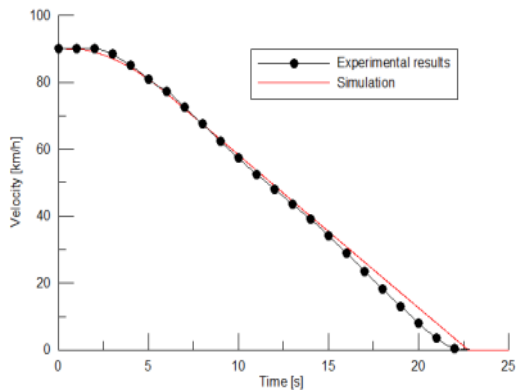


Fig. 17. Comparison of simulation and experimental results in emergency braking

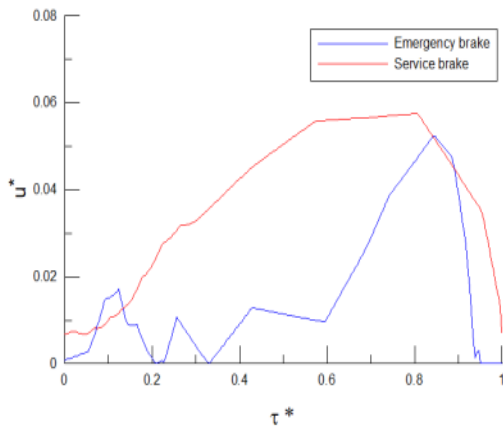


Fig. 18. Error analysis in braking

3. 결론

본 연구에서는 국내에서 화물 및 여객차량들을 견인하는 디젤전기 기관차의 제동 성능의 확인을 EN 14531-1의 시간적분법을 이용하여 동역학 해석을 수행하고 그 결과를 실차 시험결과와 비교하여 검증하였다. 제동에 영향을 미칠 수 있는 요소 즉 제동력과 외력은 마찰계수, 제동압력을 특성시험을 수행하고 타행시험법에 의한 주행저항 측정결과를 해석의 입력으로 반영하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 디젤전기기관차에 사용하는 마찰패드의 마찰계수는 Dynamo 시험을 통해 산출하였으며 다변량 회귀분석을 통해 마찰계수가 제동하중, 제동초기 속도와의 관계를 분석하여 제시하였다. 높은 제동하

중과 제동 초기속도는 상대적으로 낮은 마찰계수를 나타내었는데 이는 마찰열로 인한 온도 상승이 영향을 미친 것으로 판단된다.

2. 제동력에 영향을 주는 공압 특성을 제동조건(상용, 비상)에 따라 측정하고 분석하였다. 제동 최고압력을 조절하는 일반적인 도시철도차량과 달리, 디젤전기 기관차에서는 제동지연을 제어하는 특성을 갖고 있으며 제동 초기 급격한 압력상승을 보이고 이후 일정하게 유지하는 특성을 나타내었다.
3. 제동에 큰 영향을 줄 수 있는 마찰계수는 Dynamo 시험을 통해 확인할 수 있었으며 제동 설계시 주행속도가 높을수록 마찰계수의 저하를 고려할 수 있어야 정밀한 위치제어가 가능할 것으로 보인다.
4. 철도차량의 동적거동에 영향을 주는 외력 요소인 주행저항은 디젤전기 기관차의 타행시험을 수행하고 그 결과를 제시하고 기존의 연구에서 활용하고 있는 국내외 자료와 비교하였다. 문헌에서 제시된 디젤기관차의 주행저항은 실제 차량의 결과보다 최대 2배 가량 높은 것으로 제시되었으며 이를 반영한 해석결과가 정밀한 것을 확인하였다.

본 연구의 결과들은 마찰재료 특성에 대한 분석과 온도가 마찰계수에 미치는 상관관계에 대한 보완 연구의 근거자료로 활용될 수 있을 뿐 아니라 향후 전기기관차를 이용하는 열차의 제동특성 해석에 활용할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 차량 설계과정에서 다양한 제동 파라미터의 영향을 검토하고 성능향상의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Dong kyun Lee, Sang woo Park, Gunyub Lee, Kinam Kim, Pyung woo Shin, "Brake system characteristics analysis in domestic long freight train configuration", Proc. of the Korean society for railway, pp. 359-362, 2017.
- [2] Dong kyun Lee, Sang woo Park, Pyung woo Shin, Gunyub Lee, Hyung Suk Mun, "Characteristic analysis of the freight train brake system for entering the continental railway", Proc. of the Korean society for railway, pp. 487-490, 2018.
- [3] Jeong Jun Lee, Jeong Seo Koo, Byung Jin Cho, Hee Seung Na, Hyung Seok Mun, "Analysis and Evaluation of Reduction of Impact Force in a Coupler when a Long Freight Car Brakes", Journal of the Korean Society of

Manufacturing Process Engineers, Vol.17, No.1, pp. 130-137, 2018.

DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.1.130>

- [4] Bu-Byoung Kang, Yong Hyeon Cho, "Methods for calculation of stopping and slowing distances and braking performance parameters", Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol.17, No.5, pp. 990-997, 2015.
DOI: [10.17958/ksmt.17.5.201510.990](https://doi.org/10.17958/ksmt.17.5.201510.990)
- [5] Iwnicki S., "Handbook of railway vehicle dynamics", pp. 239 - 278, 2006.
DOI: [10.1201/9781420004892.ch1](https://doi.org/10.1201/9781420004892.ch1)
- [6] Wang F. "Vehicle system dynamics". Beijing: China Railway Publishing House, 1994.
- [7] Grag VK, Dukkupati RV. "Dynamics of railway vehicle systems". Academic Press, 1984.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-275950-5.X5001-9>
- [8] UIC 541-4, "Brakes-Brake with composition brake blocks- General conditions for composite brake block and their application", 2018.
- [9] I Kiss1, V G Cioat1, S A Ratiu1, M Rackov and M Penčić, "Statistical experiments using the multiple regression research for prediction of proper hardness in areas of phosphorus cast - iron brake shoes manufacturing", Materials Science and Engineering, 294, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012078>
- [10] EN 14531-1, "Railway applications- methods for calculation of stopping and slowing distances and immobilization braking part 1: general algorithms utilizing mean value calculation for train sets or single vehicles", 2015.
- [11] EN 14067-4, "Railway applications- aerodynamics Part 4: Requirements and test procedures for aerodynamics on open track", 2013.
- [12] Piotr Lukaszewicz, "Energy Consumption and running time for trains (Modelling of running resistance and driver behaviour based on full scale testing)", Doctoral thesis, 2001.
- [13] KS R 9217, "Railway rolling stock - test methods for running resistance", 2000.
- [14] UM user manual 8.2, "Chapter 15. Longitudinal train dynamics", 2016.
- [15] Korail, "Railway speed constant assessment standard", 2005.

최 돈 범(Don Bum Choi)

[정회원]



- 2002년 8월 : 포항공대 기계공학과 (석사)
- 2007년 8월 : POSCO 기계설비
- 2003년 11월 : 산업기계기술사
- 2016년 8월 : 아주대학교 기계공학과 (박사 수료)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도차량 제동, 신호처리, 임베디드시스템

김 민 수(Min-Soo Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 (석사)
- 2003년 8월 : 숭실대학교 전기공학과 (박사)
- 2004년 2월 ~ 2005년 11월 : 세종대학교 연구교수
- 2005년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도차량 제동, 열차제어