

## 열차제어시스템을 위한 전동차 제동특성 분석

최돈범\*, 오세찬, 김민수  
한국철도기술연구원

### Analysis of braking characteristics of electric multiple unit for train control system

Don Bum Choi<sup>\*</sup>, Sehchan Oh, Min-Soo Kim

Korea Railroad Research Institute

**요약** 본 논문은 수송량 증대를 위한 열차제어시스템의 안전거리 설계와 전동차 제동설계에 활용할 수 있는 제동모델을 제시한다. 제동모델을 위해 6량 1편성으로 운행되는 전동차의 제동특성을 시험하였다. 제동특성에 영향을 줄 수 있는 인자로는 마찰계수, 제동압력의 변화, 회생제동 등이 있으며 시험을 통해 확인하였다. 제동압력은 상용제동과 비상제동으로 구분하고 차량의 특성을 반영하였다. 주행하는 철도차량에 작용하는 외력은 주행저항을 측정 시험과 후처리 방법을 제시하고 있는 KS R 9217에 따라 시험을 수행하고 2차 다항식 형태로 해당 열차의 주행저항을 제시하였다. 차량의 재원, 마찰계수, 제동압력, 주행저항을 바탕으로 직선 평탄 선로를 주행하는 전동차의 동적 거동은 다물체 동역학 해석 소프트웨어를 이용하여 해석하였다. 해석결과는 상용제동과 비상제동에 대하여 시험결과와 비교 검증하였으며 상당히 합리적인 결과를 도출하였다. 검증된 모델은 제동초기 속도에 따른 정지거리를 분석하고 감속도 중심의 제동모델과 비교하였다. 또한, 운영기관의 마찰계수 한계치에 따라 열차제어시스템을 위한 안전거리는 변화할 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과는 철도차량들을 연결하여 운행하는 열차의 동적 거동해석에 활용할 수 있을 뿐 아니라 차량 설계에서 제동에 영향을 미치는 다양한 선로환경 분석과 제동 성능향상의 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** This paper presents a braking model that can be used to design the safety distance of a train control system and a train braking system to increase the volume of traffic. For the braking model, a train set (electric multiple unit composed 6 cars) was tested. The factors that can affect the braking characteristics include the friction coefficient, braking pressure, and regenerative braking. The braking pressure was classified into service and emergency braking and reflected the characteristics of the vehicle. The external force acting on the running railway car was tested in accordance with KS R 9217, and the running resistance of the train is presented in the form of a polynomial. The dynamic behavior of the train running on a straight flat line was simulated using UM 8.3. The results were validated with experimental data, and the results were reasonable. With the validated model, a stopping distance was determined according to the initial braking speed and compared with the deceleration braking model. In addition, a safety distance for the train control system could be changed according to the frictional coefficient limits. These results are expected to be useful for analyzing the dynamic behavior of trains, and for analyzing various railway environments and improving the braking performance.

**Keywords** : brake equipment, dynamic behavior, electric multiple unit, railway vehicle, 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 October 8, 2018

Revised December 3, 2018

Accepted December 7, 2018

Published December 31, 2018

## 1. 서론

열차 제어시스템의 중요한 목적 중 하나는 운행하는 열차들의 충돌 등 위험상황으로부터 열차를 보호하기 위한 것이다. 후행열차의 제어는 선행열차의 위치와 속도를 바탕으로 안전간격이 확보되도록 허용 속도를 계산하고 관련 정보를 제공하는 방식으로 이루어진다. 기존의 열차 제어시스템은 차상과 지상 장치의 통신을 통해 선행열차(Train A)의 위치를 확인하고 후행열차(Train B)를 제어하는 방식이 적용되고 있다(Fig. 1a). 이러한 방식은 열차의 위치검지, 지상 장치와의 통신, 허용 속도 계산 소요시간 등의 이유로 넓은 안전거리를 확보하게 되어 수송량 증대에 한계가 발생한다[1]. 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위해 열차간 직접 통신(Fig. 1b)으로 열차의 운행 간격을 줄이려는 연구가 다양한 국가에서 활발히 진행되고 있다[2, 3, 4]. 국내에서도 한계에 도달한 도시철도 수송량의 증대를 위해 열차간 통신에 의한 열차제어시스템 개발에 대한 연구가 활발히 진행중이다[5]. 이를 위해서는 통신기술, 신속한 열차 위치검지기술과 함께 정확한 안전거리를 확보할 수 있는 제동모델 개발이 필수적이다. 유럽에서는 제동장치의 고장, 선로조건의 변화 등을 고려한 다양한 운영 환경에서의 실험과 분석을 통해 확률적 안전거리에 대한 연구가 수행[6, 7]되었으나 제동성능 분석이나 제동모델의 개발에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

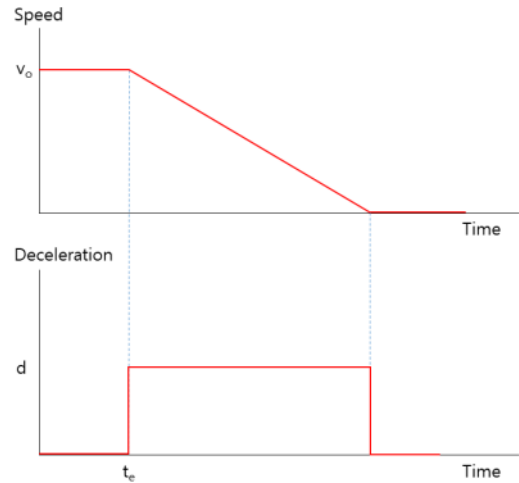


Fig. 2. Braking Model in Train Control System

일반적으로 열차제어시스템에서 제동모델은 Fig. 2에 서와 같이 일정시간( $t_e$ ) 이후 감속도( $d$ )가 일정하다고 가정하는 감속도 중심의 계단형 모델이 주로 적용된다. 계단형 모델은 계산을 단순화시킬 수 있는 장점이 있는 반면 제동장치에 따라 많은 오차가 포함될 수 있다[7]. 또한, 감속도 중심의 제동모델은 철도차량 제동 설계에 사용되는 주행저항, 마찰계수, 제동압력변화 등의 영향을 고려할 수 없다.

본 연구에서는 제동 영향인자들을 반영할 수 있는 제동모델을 통하여 열차제어시스템 설계에서 수송량 향상에 기여하고자 한다. 제동 영향인자들은 운행중인 6량 1

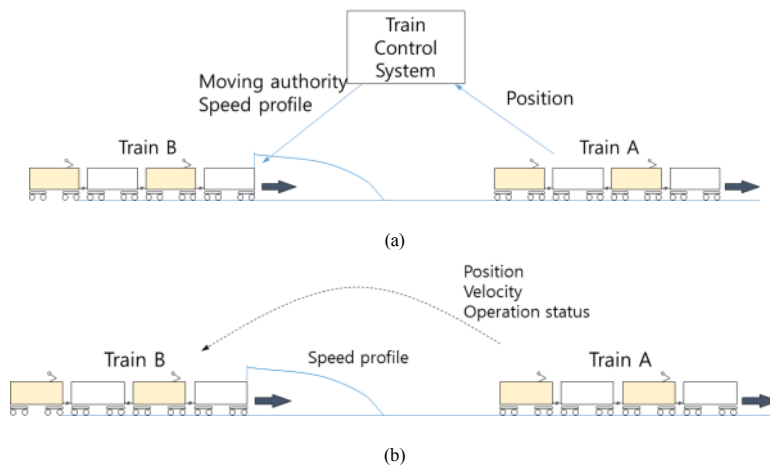


Fig. 1. Train Control Concepts

편성의 전동차를 대상으로 주행저항, 제동시험을 통해 확보하였다. 제동모델은 비상제동, 상용제동으로 나누어 동역학 해석을 수행하고 그 결과를 시험 결과들과 비교 검증하였다. 검증된 모델은 제동초기 속도에 따른 정지거리의 변화를 검토하고 제동마찰계수가 정지거리에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 본론

### 2.1 전동차의 제동시스템 특성 분석

최근 국내에 운영되는 전동차의 제동장치는 열차를 구성하는 모든 차량에 설치되어 있는 공기제동과 동력차에만 작용하는 회생제동으로 구성되어 있다. 공기제동은 다시 차륜에 직접 작용하는 답면제동 (Tread Braking, Fig. 3 (a)) 방식과 차축에 부착된 디스크를 이용하는 디스크 제동 (Disk Braking, Fig. 3 (b))으로 구분된다. 답면제동은 운행 중 발생할 수 있는 차륜손상으로 마찰계의 접촉면적이 감소할 수 있을 뿐 아니라 마모에 따라 차륜경의 변화도 제동력에 영향을 줄 수 있다[8]. 반면, 디스크 제동은 비교적 일정한 마찰 면적을 유지할 수 있을 뿐 아니라 높은 마찰계수를 적용할 수 있기 때문에 답면제동에 비해 높은 효율을 갖지만 구동용 모터와의 간섭이 있거나 운영속도가 높지 않은 화차의 경우에는 주로 답면제동을 사용한다. 회생제동(Fig. 3 (c))은 견인 모터를 발전기로 작동시켜 발전 부하를 이용한 제동 방식으로 발생된 전기는 전차선으로 송전하여 다른 열차의 운행에 활용한다.

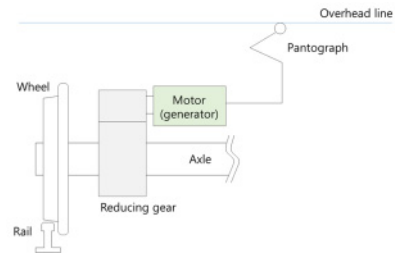
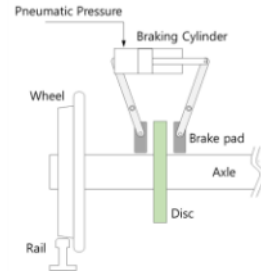
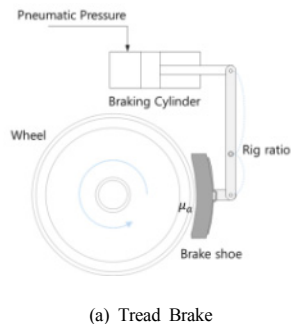


Fig. 3. Electric Multiple Unit Braking System

일반적으로 전동차는 마모가 발생하지 않는 회생제동을 우선 사용하고 부족분을 공기제동으로 보완하는 혼합제동(Brake Blending, Fig. 4)을 통하여 요구 제동력을 달성하게 된다[9]. 그러나 신속하고 신뢰성 있는 제동력이 요구되는 비상제동의 경우는 순수 공기제동만을 사용한다. 열차제어 시스템에서는 비상제동을 중심으로 안전거리를 설계하지만 본 연구에서는 일반적인 제동을 고려할 수 있도록 혼합제동을 포함한다.

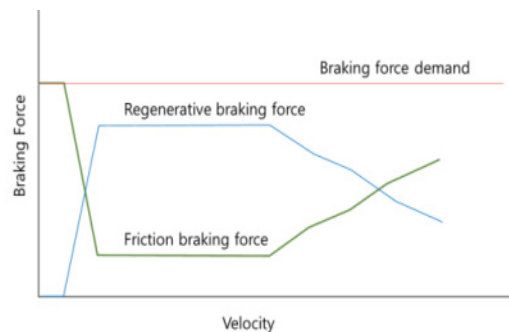


Fig. 4. Brake Blending Concept

직선 평탄선로를 주행하는 열차의 제동에 따른 감속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = \frac{F_{external} + F_{braking}}{M} \quad (1)$$

여기서  $d$ 는 열차의 감속도,  $F_{external}$ 은 외력,  $F_{braking}$ 은 제동력,  $M$ 은 열차의 총질량을 각각 나타낸다.

외력은 주행에 따른 항력 (drag force), 베어링, 차륜 마찰 등에 의한 차량 내적 요인과 선로의 경사, 곡선 등으로 인한 외적 요인으로 나눌 수 있다. 직선평탄선로를 주행하는 열차는 내적요인만을 고려하며 실험과 회귀분석을 통해 식 (2)와 같은 2차 다항식 형태로 주로 표현한다[10].

$$F_{external} = (C_1 + C_2 v + C_3 v^2) M \quad (2)$$

여기서  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 는 주행저항을 나타내는 계수이며,  $v$ 는 차량의 주행 속도를 각각 나타낸다.

제동력은 제동장치의 특성에 따라 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{braking} = \sum_{i=1}^{N_{em}} (F_{b_i} + F_{b_{reg}}) + \sum_{i=1}^{N_{et}} F_{b_i} \quad (3)$$

$F_{b_i}$ 는 각 차량에 작용하는 공기 제동력,  $F_{b_{reg}}$ 는 회생 제동력,  $N_{em}$ 은 열차 구성하는 차량들 중 동력차의 수,  $N_{et}$ 은 열차 중 무동력 차량의 수를 각각 나타낸다. 각 차량에 작용하는 공기 제동력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{b_i} = n \mu_i p_i A_i \tau_i \quad (4)$$

여기서  $n$ 은 차량에 설치된 제동장치의 수,  $\mu_i$ 는 제동 평균마찰계수,  $p_i$ 는 공기 제동실린더 압력,  $A_i$ 는 제동실린더 단면적,  $\tau_i$ 는 증폭비율을 각각 나타낸다.

연구의 대상이 되는 전동차는 견인력을 발휘하는 동력차(Motor car)가 3량, 부수차(Trailer car)가 3량으로 구성(3M3T)된 되었으며 공차 상태의 중량 230.2 tonne이며 열차의 주요 제원과 제동장치를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Properties of Train

	Train Formation					
	Train control car 1	Motor car 1	Motor car 2	Trailer car	Motor car 3	Train control car 2
Weight, empty [tonne]	38.1	40.8	40.8	31.6	40.8	38.1
Length [m]	20.3	20	20	20	20	20.3
Regenerative Brake	No	Yes	Yes	No	Yes	No
Pneumatic Brake	Disk	Tread	Tread	Disk	Tread	Disk
Brake Cylinder Area [m2]	0.03237	0.02493	0.02493	0.03237	0.02493	0.03237
Total Amplification Ratio	2.196	3.87	3.87	2.196	3.87	2.196
Q'ty. of brake equip.	8	8	8	8	8	8

## 2.2 주행저항 (Running Resistance)

주행저항은 차량의 외형과 적용된 베어링 등의 특성이 다르기 때문에 일괄적으로 적용하기 어렵다. 주행저항의 측정에는 주로 견인봉(Draw Bar)을 이용하는 방법과 타행시험 방법 (coasting test)이 있다. 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 평탄 선로에서 일정 속도로 주행시킨 후 제동이나 동력을 사용하지 않는 타행운전(coasting driving)하면서 저항에 의해 움직임이 멈출 때까지 속도와 시간을 측정하여 소요되는 힘을 산출하는 방식이다 [11, 12].

본 연구에서는 KS R 9217의 타행시험법에 따라 해당 열차를 지하구간에서 타행운행 (Coast Driving)하면서 속도를 계측하였다. 선로 허용 최고속도 (90 km/h)에서 정차할 때까지 시험하였으며 직선평탄 선로의 시험거리가 충분하지 않아 13%의 직선 경사면에서 반복시험을 통하여 정차할 때까지의 속도이력을 확보하였다.

규격에 따라 경사면에서의 보정을 수행하고 2차 다항식으로 회귀분석한 결과를 식 (5)와 Fig. 5에 나타내었다.

$$F_{external} [kN] = 0.17 + 0.004 V + 0.0006 V^2 \quad (5)$$

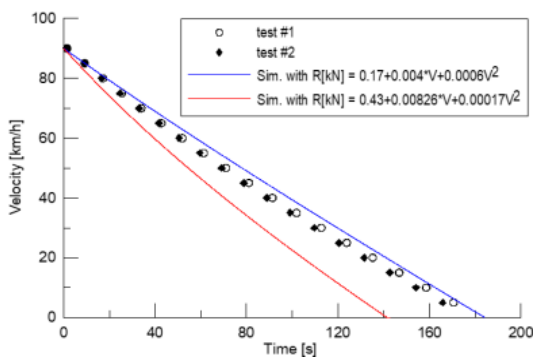


Fig. 5. Running Resistance Test Results

도시철도 운영기관의 차량설계 지침에서는 지하구간을 주행하는 전동차의 주행저항을 식 (5)와 같이 제시 ([13])하고 있으며 이를 이용한 결과를 Fig. 3에 함께 나타내었다.

$$F_{external} [kN] = 0.43 + 0.00826 V + 0.0001 V^2 \quad (6)$$

운영기관의 주행저항과 시험결과를 비교(Fig. 5)하면 본 연구에서의 주행저항 결과가 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다. 차량설계의 기준이 되는 주행저항은 견인력을 산정하기 위해 보수적으로 제시한 결과로 보인다. 실제보다 큰 주행저항의 예측은 전동기의 용량을 크게 설계하여 차량이나 선로의 노후화 등을 반영하여 운영측면에서 안정적인 수 있지만 중량이 커져 운영효율이 낮아지는 단점과 함께 제동장치 설계에서는 필요보다 낮은 제동력을 요구하기 때문에 정확한 주행저항의 예측이 바람직하다.

## 2.3 제동해석 및 검증

식 (4)의 제동력 계산을 위해서는 제동장치에 사용되는 공기 압력을 측정해야 한다. 본 연구에서는 순수 공기 제동을 사용하는 비상, 상용제동을 회생제동과 함께 사용하는 혼합 제동시의 제동압력과 회생제동력을 각각 측정하였다. 제동신호는 측정시작 1초 후 작동하도록 설정하였으며 모든 차량에서 제어차량 (Train control car)와 첫 번째 동력차 (Motor car 1)에서 제동압력을 측정하였다. 전동차의 제동지령이 공기압력으로 전달되는 화차와 달리 전기신호로 전달되기 때문에 차량간 제동 작동시간이 동일한 것으로 가정하였다.

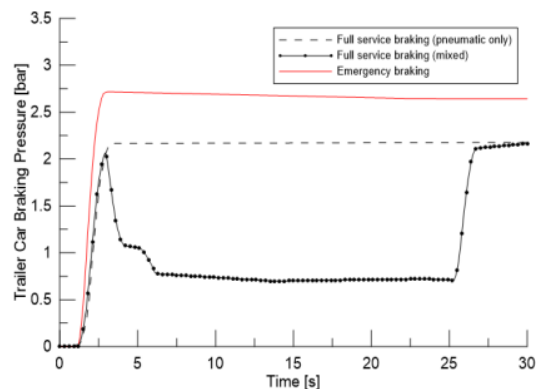


Fig. 6. Brake Cylinder Pressure at Trailer Cars

부수차와 동력차의 제동실린더 압력을 비상제동, 순수공기 상용제동, 혼합 상용제동으로 구분하여 Fig. 6와 Fig. 7에 각각 나타내었다. 부수차는 Table 1에서 열차를

제어하는 Train Control Car 1, 2, Trailer Car가 각각 해당하며 동력차는 Motor Car 1, 2, 3가 각각 해당한다.

상용제동과 비상제동은 압력 상승시간과 최고압력에서 차이를 갖는다. 혼합제동에서는 동력차에서 발생하는 회생제동력을 보상하기 위해 생성되는 압력으로 부수차와 동력차가 서로 다른 양상을 나타내었다.

동력차의 제동실린더 압력은 제어차량에 비해 높은데 이는 동력차의 중량이 부수차량에 비해 크기 때문인 것으로 보인다. 또한 압력상승 형상에서도 차이가 있는데 제동배관과 밸브의 특성에 기인한 것으로 보인다.

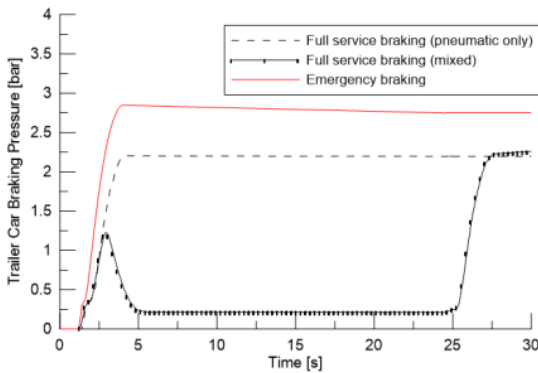


Fig. 7. Brake Cylinder Pressure at Motor Cars

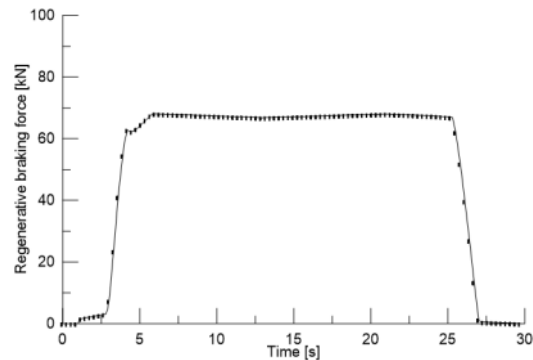


Fig. 8. Regenerative Braking Force at Motor Cars

Fig. 8에는 혼합제동시의 회생제동력을 측정된 결과를 나타내었다. 회생제동력은 저속 구간에서 제동력이 급격하게 감소되는 특성을 갖고 있었다.

Table 1의 차량 제원과 주행저항, 측정된 제동압력의 변화를 반영하여 동역학 해석을 수행하였다. 동역학 해석에는 UM 8.3의 열차모듈 (UM train module, [14])을 이용하였다. 제동마찰계수는 도시철도 운영기관에서 요

구하는 평균 마찰계수(답면제동 0.25, 디스크 제동 0.35, [15])을 각각 적용하였으며 제동하는 동안 일정하다고 가정하였다. 이때 부수차는 제어차와 동일한 제동특성을 갖고 모든 동력차는 같은 제동 특성을 갖는 것으로 가정하였다. 직선 평탄선로를 주행하는 차량의 비상제동과 상용제동시의 속도변화를 시험 결과와 비교 검증하였다.

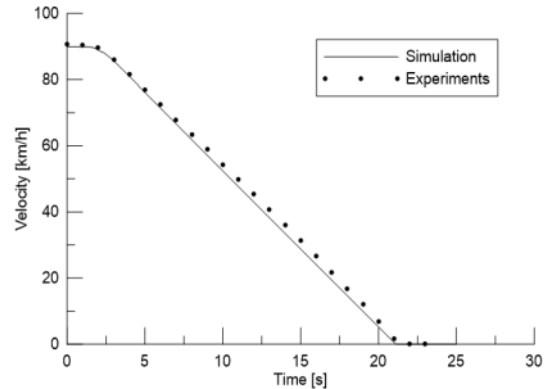


Fig. 9. Emergency Braking Distance Comparison

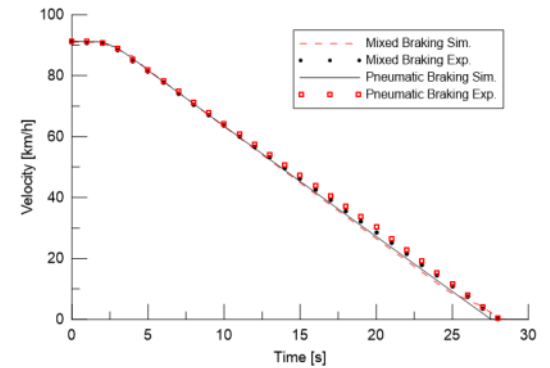


Fig. 10. Service Braking Distance Comparison

열차는 공차상태로 지하구간에서 선로 허용 최고속도 (약 90 km/h)로 직선평탄 선로를 주행하기 시작하여 1 초 후 제동이 체결되어 완전히 정차할 때까지 제동이 체결되는 조건으로 적용하였다.

공기제동만을 사용하는 비상제동의 경우 실측한 속도 이력과 해석결과와의 비교(Fig. 9)에서 알 수 있듯이 상당히 신뢰할 수 있는 수준으로 정확하게 예측함을 알 수 있다. 다만, 중간 속도영역 (30~50 km/h)에서 해석결과는 실측결과보다 작게 예측되었는데 이는 적용된 마찰계수가 실제와는 일정하다고 가정하였고 제어차와 부수차의 제동력이 동일하다고 적용했기 때문인 것으로 추정된다.

상용제동(Service Braking)에서는 혼합제동과 공기제동만을 사용하는 두 가지 조건을 각각 해석결과와 비교하였다. Fig. 10에서와 같이 실측결과와의 비교시 동역학 해석 모델이 제동특성을 충분히 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

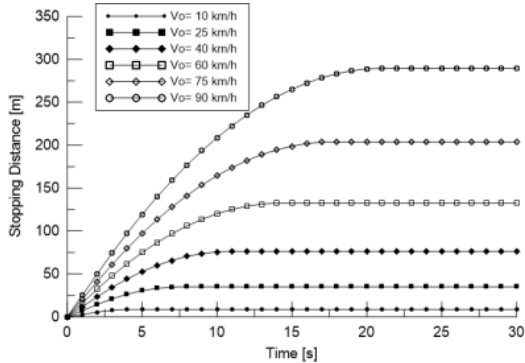


Fig. 11. Stopping distance with initial velocity (Emergency Braking)

#### 2.4 열차제어시스템을 위한 정지거리

열차제어시스템의 안전거리는 열차가 비상 제동할 때의 정지거리를 기초로 계산한다. Fig. 11에는 열차가 비상제동을 체결할 때의 운행 속도에 따른 정지거리를 해석한 결과를 나타내었다. 계단형 감속도 모델로 정지거리는 식 (7)과 같다.

$$s = v_o t_e + \frac{1}{2} \frac{v_o^2}{d} \quad (7)$$

여기서,  $s$ 는 정지거리,  $v_o$ 는 제동 초기속도,  $t_e$ 는 제동인가시간,  $d$ 는 감속도를 말하며 비교를 위한 계산에서는 EN 13452-1에서의 전동차의 요구조건인  $t_e = 1.5 s$ ,  $d = 1.0 m/s^2$ 를 적용하였다. Table 2에는 계단형 감속도 모델과 동역학 해석모델의 정지거리 해석 결과를 나타내었다. 초기속도가 낮은 경우 차이는 크지 않지만 속도가 높아질수록 차이가 증가하고 있으며 통신지연 등 안전시간을 고려하면 차이는 더욱 커질 수 있다.

Table 2. Stopping distance with sim

Initial Velocity, $v_o$ [km/h]	Step Deceleration Model [m]	Sim. Model [m]	Differences [m]
10	10.0	8.5	1.5
25	36.6	34.4	2.2
40	77.2	76.2	1.0
60	152.8	132.1	20.7
75	225.7	203.2	22.5
90	312.5	290.9	21.6

Table 3. Brake Friction Coefficients

	Lower Limit	Mean	Upper Limit
Disk Braking	0.30	0.35	0.40
Tread Braking	0.21	0.25	0.29

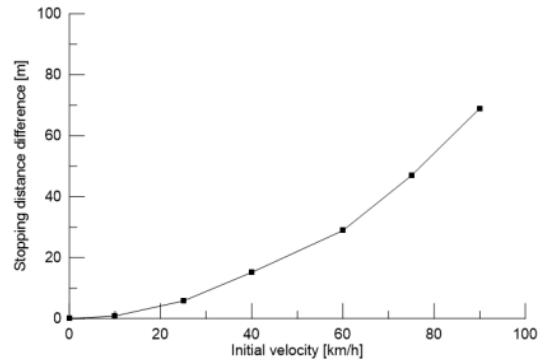


Fig. 12. Stopping distance differences with upper and lower limit friction coefficients

공기제동 마찰계수는 제동 마찰재의 재질 특성에 따라 일정한 것이 아니라 변하게 된다. 일반적으로는 제동 마찰계수의 범위를 운영기관에서 요구하고 있다. 마찰계수의 변화가 정지거리에 미치는 영향을 검토하기 위하여 마찰계수가 Table 3과 같은 범위를 갖는다고 가정하고 비상제동시의 정지거리를 해석하였다. 이 경우에도 열차는 공차 상태의 경우만 반영하였다.

마찰계수 한계치에 따른 정지거리 해석 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 열차간 통신에 의한 열차제어시스템의 경우 열차간 안전 간격은 속도가 높을수록 마찰계수의 변화에 따른 안전거리를 확보해야 함을 의미한다. 즉

마찰계수 영향만으로도 선형열차의 정지거리는 짧아 질 수 있으며 후행열차의 정지거리는 길어질 수 있어 명목 마찰계수 기반의 정지거리를 안전거리로 확보하면 동일 시점에 비상제동을 체결하여도 추돌의 위험성이 나타나기 때문이다.

### 3. 결론

본 논문은 열차제어시스템 설계의 기초가 되는 차량의 제동성능 영향인자를 실차 시험을 통하여 분석하고 이를 바탕으로 동역학 해석을 수행하였다. 동역학 해석 결과는 시험 결과와 비교 검증을 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 실측 제동압력을 반영한 제동모델의 동역학 해석 결과들은 비교적 정확한 속도 및 제동거리 정보를 제공할 수 있음을 확인할 수 있다. 이를 통해 정차 상태에서의 제동압력 측정 만으로도 주행시의 제동거리를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.
2. 비상제동과 상용제동에 따른 압력의 변화를 확인하고 이를 반영하고 실측 결과와 비교하였다. 일반적으로 열차제어시스템 설계에서 사용하는 계단형 감속도 모델보다 안전간격을 줄일 수 있음을 확인하였다. 반면, 제동 마찰계수의 영향으로 운행속도에 따라 확보해야 하는 안전거리가 증가함을 확인하였다.
3. 본 모델은 선로의 경사나 곡선 등의 영향을 반영할 수 있는 모델로 확장할 수 있으며 차량별로 제동장치 고장에 따른 정지거리의 증가, 탑승인원에 따른 제동거리의 변화 등을 모사할 수 있어 열차제어 시스템 설계시 반영할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.
4. 해석방법과 결과는 열차제어시스템 설계의 정확도를 높이고 정밀한 간격제어로 운행밀도로 높여 수송력 향상에 기여할 수 있을 뿐 아니라 차량 승차감 향상, 등의 설계 자료로도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 결과들은 마찰재료 특성에 대한 분석과 온도가 마찰계수에 미치는 상관관계에 대한 보완 연구의 근거자료로 활용될 수 있을 뿐 아니라 향후 전동차를 이

용하는 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] Sehchan Oh, Kyunghee Kim, Hyeonyeong Choi, Minsoo Kim, "Train-centric distributed interlocking system for autonomous train control", Proc. of fall conference on the Korean Society for Railway, 2016.
- [2] J.Y Kim, S.W. Choi, Y.S. Song, Y.K. Yoon, Y.K. Kim, "Automatic Train control over LTE: Design and performance evaluation", IEEE communications magazine, october pp. 102~109, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7295470>
- [3] Y.K. kim, Y.S. Song S. C. Oh, "Study on the Plan of the KRTCS technology development unrelated to speed and operational environment", 2012 IASME-WSEAS, Athens, pp. 215~219, 2012.
- [4] B. Ning, T. Tang, K. Qiu, C.Gau & Q. Wang, "Advanced Train Control System: CTCs-Chinese Train Control System", WIT press, Southampton, pp. 1-8, 2010.
- [5] Sehchan Oh, Kyunghee Kim, Hyeonyeong Choi, "Train interval control and train-centric distributed interlocking algorithm for autonomous train driving control system", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 17, No. 11, pp. 1-9, 2016.  
DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.11.1>
- [6] International union of railways, UIC B 126/DT 421 "Comparison between probabilistic mathematical safety margins calculations and operation data", 2008.
- [7] M. Malvezzi, P. Presciani, B. Allotta, P. Toni, "Probabilistic Analysis of Braking Performance in Railways", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 217, Issue 3, 2003.  
DOI : <https://doi.org/10.1243/0954409037690>
- [8] Seung Kon Min, Jeong Seo Koo, "A study on Acceleration Performance of EMUs Accordign to Wheel Diameter Changes", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 30, No. 5, pp. 92-99, 2015.  
DOI : <http://dx.doi.org/10.14346/JKOSOS.2015.30.5.92>
- [9] EN 14531-1 Railway applications, "Methods for calculation of stopping and slowing distances and immobilization braking. General algorithms utilizing mean value calculation for train sets or single vehicles", 2015
- [10] Hyunjik Cho, Wonsang Lee, "A Study on Prediction of Running Resistance and Train Performance", Proc. of spring conference on the Korean Socceity for Railway, 2018.
- [11] Piotr Lukaszewicz, "Energy Consumption and running time for trains (Modelling of running resistance and driver behaviour based on full scale testing)", Doctoral



thesis, 2001.

- [12] KS R 9217 “Railway rolling stock - test methods for running resistance”, 2000.
- [13] Korail Engineering Center, “A Study on Design Criteria of Railway Vehicle”, 2013.
- [14] UM user manual 8.2, “Chapter 15. Longitudinal train dynamics”, 2016.
- [15] Seoul Metro, “Stadard Specification: Brake lining, brake shoes”, 2016.

**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

**오 세 찬(Sehchan Oh)**

[정회원]



- 2008년 8월 : 광주과학기술 정보통신공학과 (석사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 아주대학교 컴퓨터 공학 박사과정
- 2004년 11월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

열차제어, DTO/DTU 설계

**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