

감속도 신호에 의한 속도-제동력 고찰

A Study on Velocity-Brake Force Resulted from Deceleration Signal

이 우 동*

* 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단(전화:(031)460-5726, 팩스:(031)460-5746, E-mail : wdlee@krri.re.kr)

Abstract : Brake action is important in train operation. In case of diesel motor cas, coaches and wagon, the brake system is only act on the stop of train, but it is emphasis on safety and convenience in urban transit system such as EMU, subway, AGT, etc. Brake of EMU has two types. one is called service brake that is used at normal operation. The other is called emergency brake. it is used at emergency operation. Service brake bring a EMU to a halt through a blending brake that form electronic brake and frictional brake. Generally EMU compose motor car and trailer car. Blending brake bring a EMU to a halt through a blending brake that form electronic brake of motor car and frictional brake of trailer car. Blending braking technology have different characteristics each nations or manufacturing companies. but deceleration command that is parameter decide blending brake. According to deceleration command, electronic brake and frictional brake are applied differently. So braking power is different. electronic brake and frictional brake must be used appropriately as deceleration command. Also braking facilities must be stopped EMU more economically and safely through revision of algorism about blending brake according to output diagram. Thus The purpose of paper is to propose blending braking control way as consideration of braking output diagram used deceleration command that influence blending brake of EMU.

Keywords : ECU, CC, ATC TCMS, Blending Control

1. 서론

전동차의 안전운행에 있어서 제동작용의 역할은 매우 중요하다. 디젤기관차나 객차와 같은 열차는 제동장치가 단순히 정지하는 기능을 수행하면 되었으나 전동차와 같은 도시철도차량은 점차 안전성 및 쾌적성이 강조되게 되었다. 이를 위하여 전동차의 제동장치는 단순한 구조로서 기계적인 방법으로 작동되는 구조에서 마이크로프로세서에 의하여 전기제동 및 마찰제동을 혼합하여 작동하는 혼합제동방식의 구조로 변화되고 있는 추세이다.

특히 자동운전 및 무인운전방식이 적용된 전동차의 경우에는 역구간의 한정된 공간과 승객의 안전성 확보를 위하여 열차가 정지선에 정확하게 정지하여야만 한다. 전동차가 정해진 역구간에서 정확히 정차하기 위하여는 전동차의 정위치에 영향을 주는 파라미터들을 정확히 분석하고 제동작용시에 혼합제동을 정확히 구현하여야만 한다. 전동차의 정위치제어에 영향을 주는 파라미터나 장치는 여러 가지가 있으나 여기서는 제동작용시에 영향을 주는 파라미터인 감속도신호를 우선 고찰하였다.

전동차의 제동작용은 정상운전시에 사용되는 상용제동과 비상운전시에 사용되는 비상제동으로 구분되어 있다. 상용제동시에는 전기제동 및 마찰제동을 혼합하여 제동작용을 수행하는 혼합제동을 통하여 차량을 정지시킨다. 전동차는 일반적으로 구동차와 부수차로 편성되어 있는데 혼합제동이란 구동차의 전기제동과 구동차 및 부수차의 마찰제동을 혼합하여 열차를 정지시키는 제동을 말한다. 혼합제동기술은 전동차를 제작하는 국가 또는 제작사마다 각기 고유의 특성을 지니고 있으나 그러나 혼합제동을 결정하는 파라미터인 감속도신호는 감속도신호에 따라 전기제동 및 마찰제동을 적용이 다르며 따라서 제동력도 다르게 나타난다.

감속도신호에 따라 전기제동과 마찰제동을 적절히 사용하도록 해야 하며 그 출력선도에 따라 혼합제동에 대한 알고리즘을 수정하여 보다 경제적이고 안전하게 제동장치가 전동차를 정지시킬 수 있도록 해야 한다.

따라서 본 연구의 목적은 제동작용시에 열차의 혼합제동시에 영향을 주는 감속도신호를 이용하여 제동출력선도를 고찰함으로써 혼합제동제어방법을 개선하고자 하는 것이다.

II. 전동차 제동장치의 구조

전동차는 일반적으로 4량, 6량, 8량 및 10량으로 편성되어 있다. 이는 승객의 수송수요와 역사의 길이에 따라 달라진다. 열차를 구성하는 차량은 크게 구동차 및 부수차로 나누어지는데 열차의 편성은 이들 구동차(M car), 부수차(T car) 및 제어차(Tc car)의 조합으로 이루어진다. 따라서 열차에 편성되어 있는 차량의 구성에 따라서 차량을 구성하는 장치의 구조 및 위치가 다르게 되며 열차를 정지시키는 제동장치 또한 구조 및 위치를 조금씩 달리하게 된다. 일반적으로 열차에 설치되어 있는 제동장치는 차량마다 구동차 및 부수차에 따라 달라지며 이는 전동차가 구동차 및 부수차를 1 유니트로 하는 혼합제동을 구현하기 때문이다.

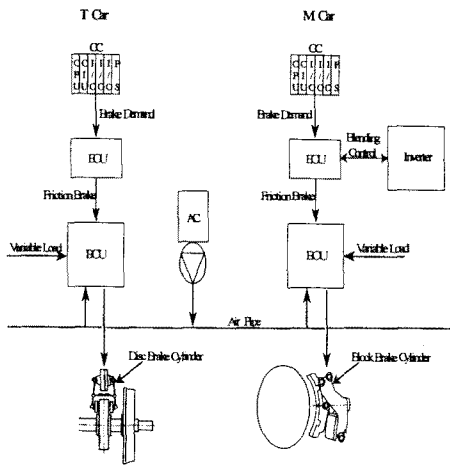


그림 1 전동차의 제동장치 구조

표준전동차의 제동장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 제동제어기, 제동작용장치, 공기압축기 및 제동실린더 등으로 구성되어 있다. 상용제동시에는 주간제어기 및 ATC에서 발생한 제동지령이 CC를 통하여 ECU로 전송되고 ECU에서는 제동지령과 옹하중신호를 검지하여 필요한 요구제동력을 계산하고 인버터에 전기제동을 지령한다. 요구제동력을 전기제동이 만족하지 않으면 ECU는 T Car에 마찰제동력을 수행하고 부속분을 M Car의 마찰제동으로 보충하는 혼합제동을 수행한다. 혼합제동방식은 T Car 및 M Car를 1 유니트로 하는 혼합제동방식을 적용하고 혼합제동작용은 제동제어기에서 수행한다. 마찰제동에 필요한 공기는 M1 및 M2 Car에 설치 주공기압축기에 의하여 공급되며 주공기배관은 싱글배관으로 구성되어 있다.

III. 연구 내용

(1) 전동차의 감속도

전동차의 감속도는 단위시간당 속도의 변화율로서 정의된다. 도시철도차량에 있어서 감속도는 열차의 제동 성능과 밀접한 관계를 가지고 있다. 열차의 감속도를 정의하기 위해 열차가 선로위를 달리므로 직선운동을 한다고 가정하고 이에 따른 운동방정식을 유추할 수 있다.

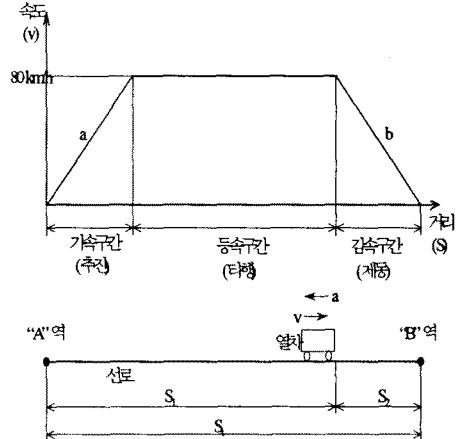


그림 2 역간 열차운행시의 속도, 거리 및 가속도 그래프

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (4-1)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} \quad (4-2)$$

여기서 dt를 제거하면 변위, 속도 및 가속도를 연결하는 미분방정식이 도출된다.

$$v \, dv = a \, ds \quad (4-3)$$

여기서 가속도는 일정하다고 가정하면

$$\int_{v_0}^v v \, dv = a \int_{s_0}^s ds \quad (4-4)$$

이것을 적분하면

$$v^2 - v_0^2 = 2as \quad (4-5)$$

열차가 정지하기 위하여 나중속도는 영이 되므로

$$v^2 = 2as \quad (4-6)$$

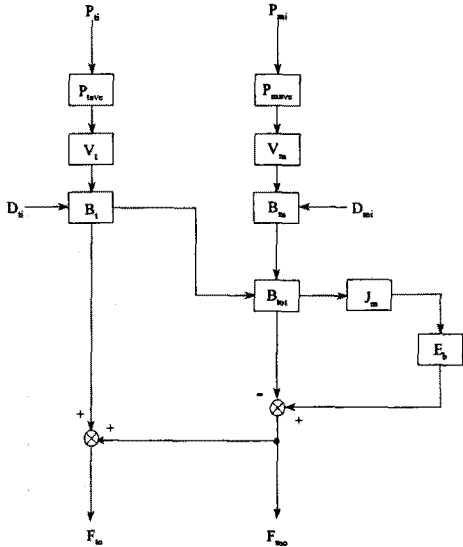
운행되고 있는 열차는 속도감출기에 의한 현재속도와 역간거리정보DB에 의한 현재위치를 알고 있으며 따라서 열차가 정지하기 위하여 제동장치로 입력되는 감속도 파라미터는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$a = \frac{v^2}{2s} \quad (4-7)$$

따라서 열차는 정지하기 위하여 일정한 감속도를 계산하여 제동장치로 입력시키며 제동장치는 이 감속도 값에 따라 제동력을 계산한다.

(2) 혼합제동(Blending Control) 제어방법[2]

혼합제동이란 부수차 및 구동차를 1유닛으로 하여 열차르 정지시킬 때 구동차의 전기제동을 우선하여 작용하고 회생제동이 부족하면 부수차 및 구동차의 마찰제동을 작용시켜 열차를 정지시키는 제동을 말한다.



- B_t, B_m : 부수차 및 구동차의 제동지령
- L_t, L_m : 부수차 및 구동차의 용하중 측정값
- V_t, V_m : 부수차 및 구동차의 제동력 연산
- J_t, J_m : 부수차 및 구동차의 저크제어

그림 3 표준전동차 혼합제동 제어블럭도

혼합제동시에 제동작용순위는 다음과 같다.

- 제동초기
 - M Car 및 T Car : 마찰제동
- 유닛 요구제동력 < 회생제동력
 - M Car 및 T Car : 회생제동
- M Car 요구제동력 < 회생제동력 < 유닛 요구제동력
 - M Car : 회생제동, T Car : 회생 + 마찰제동
- 회생제동력 < M Car 요구제동력
 - M Car : 회생제동+마찰제동, T Car : 마찰제동
- 회생제동력 실패시
 - M Car : 마찰제동, T Car : 마찰제동

제동감속도 파라미터, 용하중 파라미터, 및 저크한계 파라미터 등을 고려하여 시스템을 설계하여 제동력이 제동성능기준에 의해 계산된 제동력을 발생하면 이 시스템은 정밀정지를 위한 제어시스템이 설계되었다고 정의할 수가 있는 것이다. 그림 3은 이러한 파라미터를 고려한 혼합제동 제어개념을 도식화 한 것이다.

대차의 공기스프링에 설치되어 있는 압력센서에 의해

공기압력이 검출되며 이 압력은 공전변환기에 의해 전압신호로 변환되어 전자제동제어기(Electronic Control Unit, ECU)로 입력된다. 이 신호 (D_{ti}, D_{mi})는 한 차량에 4개가 설치되어 있으므로 공기압을 평균하여야 한다.

부수차의 공기압력 평균값

$$P_t = \frac{P_{t1} + P_{t2} + P_{t3} + P_{t4}}{4} \quad (6-1)$$

구동차의 공기압력 평균값

$$P_m = \frac{P_{m1} + P_{m2} + P_{m3} + P_{m4}}{4} \quad (6-2)$$

차량의 중량을 계산하기 위하여 공기스프링의 단면적에 차량의 질량을 곱하고 여기에 회전관성질량계수를 곱하면 식 와 같다.

$$\begin{aligned} V_t &= \eta_t \cdot P_t \cdot A_t \\ &= (1.06) \cdot P_t \cdot \frac{\pi \cdot d_t^2}{4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_m &= \eta_m \cdot P_m \cdot A_m \\ &= (1.14) \cdot P_m \cdot \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \end{aligned}$$

차량에 설치되어 있는 종합제어감시장치(Train Control Monitoring System, TCMS)에서 전자제동제어기로 감속도지령 (D_{ti}, D_{mi})이 입력되는데

따라서 감속도 지령에 따라 계산되는 구동차 및 부수차의 요구제동력은 다음과 같다.

부수차의 제동력은 Newton의 제2법칙 $F=ma$ 에 의해 계산된다.

$$B_t = V_t \cdot D_{ti} \quad (6-3)$$

$$B_m = V_m \cdot D_{mi} \quad (6-4)$$

열차의 제동력제어는 부수차 및 구동차를 1유닛으로 하여 제어되어야 하므로 부수차 및 구동차의 요구제동력은 합산하여야 한다.

$$B_{tot} = B_t + B_m \quad (6-5)$$

합산된 총요구제동력은 혼합제동우선순위에 의하여 회생제동이 먼저 작용하도록 추진제어장치에 전기제동을 요구하게 된다. 전기제동을 요구하기 전에 차량의 승차감을 확보하기 위하여 저크제한기능을 추가하였다.

제동장치 설계기준에서 저크제한기준은 0.8 m/s^3 [3]이므로 일정한 시간지연을 갖고 최대감속도로 도달하게 하여야 한다. 즉 1.2125초의 시간지연을 갖도록 설계하는 것이다. 이를 위하여 스텝신호로 입력되는 제동요구신호를 램프신호로 바꾸기 위해 적분제어기[6]를 추가하였다. 여기에 이득게인을 적용하여 그림 14와 같이 저크제한기준을 만족하도록 설계하였다.

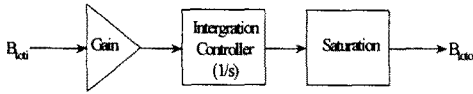


그림 4 저크제어 블록선도

전기제동요구신호는 PWM(Pulse Width Modulation)신호로 변환되어 추진제어장치로 전송되며 이는 0~120kN에 대하여 10~90%의 값을 가진다. 추진제어장치에 설치되어 있는 견인전동기의 회생특성에 따라 회생제동을 최대한 수행한후에 달성된 신호를 다시 전자제동제어기로 전송한다. 회생제동달성신호도 PWM신호로 변환되어 추진제어장치로 전송되며 이는 0~120kN에 대하여 10~90%[4]의 값을 가진다.

실제로 본 연구에서는 회생제동특성을 기존전동차에서 측정되었던 회생제동달성치를 적용하여 Matlab에서 Simulation하였다. 이는 기존에 열차의 견인전동기의 회생특성에 따라 전기제동력이 달라진다. 견인전동기의 회생특성에 따르는 회생비율은 표 3과 같으며 이는 수학적 모델링보다는 실험치가 보다 정확하므로 이를 적용하였다. 전자제동제어기는 총요구제동력에서 추진제어장치에서 수신한 회생제동달성신호를 감하여 마찰제동을 수행하게 되는데 혼합제동 우선순위에 따라 부수차의 마찰제동을 먼저 작용시키기 위해 부수차의 제동작용장치에 마찰제동력신호 (F_{10})를 출력시킨다. 부수차의 마찰제동력으로도 총요구제동력을 만족하지 못할 경우에는 구동차의 마찰제동을 작용하기 위하여 구동차의 제동작용장치에 마찰제동력신호 (F_{m0})를 출력시킨다. 이 혼합제동과정을 Matlab의 Simulink를 이용하여 제어블럭선도를 작성하여 그림 5과 같은 혼합제동에 관한 Simulink를 구현하였다.

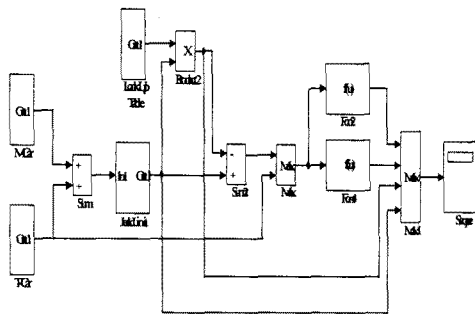


그림 5 혼합제동 Simulink[7]

(3) 시스템 해석 및 결과

혼합제동 제어블럭선도를 Matlab의 Simulink를 이용하여 시뮬레이션한 후에 그 결과를 그래프로 출력하면 그림 6, 7, 8과 같은 결과가 나타난다. Simulink에서 혼합제동의 특성을 고찰하기 위하여 다음과 같은 4개

부분의 출력신호를 그래프로 구현하였다.

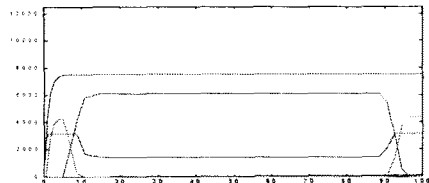
그래프로 출력되는 선도를 고찰하면 요구제동력, 전기제동, 부수차의 마찰제동 및 구동차의 마찰제동이 적절히 혼합되어 작용함을 볼수가 있으며 이는 혼합제동 설계요건을 만족하고 있다. 제동초기에는 전기제동이 작용하지 않으므로 부수차 및 구동차의 마찰제동으로 요구제동력을 만족하다가 전기제동력이 상승하면서 이에 비례하여 구동차 및 부수차의 마찰제동력이 하강하고 전기제동력이 최대가 되면 부수차 및 구동차의 마찰제동력은 작용하지 않는다. 차량이 정지지점에 들어서는 구간인 저속구간에서는 전기제동이 하강하면서 이에 비례하여 마찰제동력이 상승하게 된다. 전기제동이 작용하지 않게 되면 구동차 및 부수차의 마찰제동력이 최대로 된다. 구동차 및 부수차의 마찰제동력은 전동차의 제동균형을 맞추기 위하여 부수차의 마찰제동력이 우선하여 작용하고 부족분을 구동차의 마찰제동력으로 보충하도록 시뮬레이션 하였다.

그림 6는 최대제동인 7스텝신호가 입력되는 경우에 나타나는 혼합제동 출력선도로서 만차상태와 공차상태로 출력한 결과 제동초기 및 말기뿐만 아니라 전기제동력이 최대로 작용하는 구간에서도 요구제동력을 만족하지 못하므로 부수차 및 구동차의 마찰제동력이 이를 보충하고 있음을 나타내고 있다.

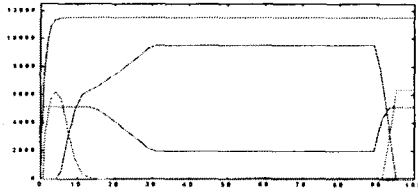
그림 7은 6스텝신호가 입력되는 경우에 나타나는 혼합제동 출력선도로서 만차상태와 공차상태로 출력한 결과 제동초기 및 말기뿐만 아니라 전기제동력이 최대로 작용하는 구간에서도 요구제동력을 만족하지 못하고 있지만 전기제동력이 요구제동력을 거의 만족하고 있음을 보여주고 있다.

그림 8은 4스텝신호가 입력되는 경우에 나타나는 혼합제동 출력선도로서 만차상태와 공차상태로 출력한 결과 전기제동력이 최대로 작용하는 구간에서는 요구제동력을 만족하므로 마찰제동력이 전혀 작용하지 않음을 보여주고 있다.

그림 6, 7, 8에서 나타난 혼합제동 시뮬레이션 결과를 통하여 제동작용을 할때 혼합제동의 추이를 사전에 분석할수 있다. 이 결과가 실제 제동시험결과와 다소 차이가 나타나지만 이는 여러 가지 파라미터와 시스템 마다의 특성이 다르기 때문에 나타나는 결과라고 할 수 있다.

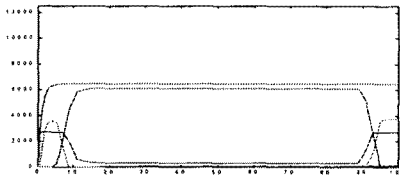


7스텝 만차

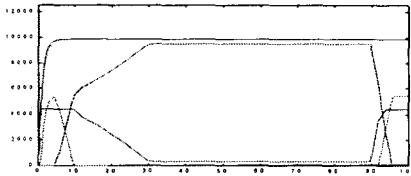


7스텝 공차

그림 6 7스텝 입력시 혼합제동출력선도

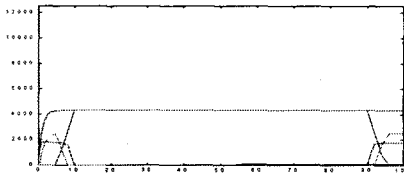


6스텝 만차

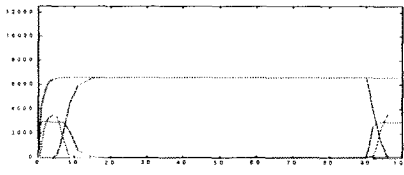


6스텝 공차

그림 7 6스텝 입력시 혼합제동출력선도



4스텝 만차



4스텝 공차

그림 8 4스텝 입력시 혼합제동출력선도

IV. 결론

전동차의 혼합제동은 구동차의 전기제동과 구동차 및 부수차의 마찰제동을 적절히 혼합하여 사용하는 제동이다. 이 혼합제동의 궁극적인 목적은 에너지 절감에 있다. 그러나 에너지를 절감하는 반면에 제어방법에 따라 전동차의 제동력에 영향을 미치고 이는 곧 승객의 안전에 중대한 영향을 준다. 그런 점에서 볼 때 혼합제동시의 제동력에 영향을 주는 파라미터를 분석하고 이에 따라 전기제동과 마찰제동을 적절히 제어하는 것이 매우 중요함을 본 연구에서 고찰하였다. 혼합제동 시뮬레이션 및 속도-제동력 출력선도 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째로 혼합제동에 직접 영향을 주는 제동파라미터는 감속도파라미터임을 도출하였다. 즉 감속도지령에 따라 속도-제동력곡선이 달라질 수 있다는 것이다.

둘째로 혼합제동 시뮬레이션과 제동성능 시험결과와 출력력을 분석한 결과 요구제동력에 따라 전기제동과 마찰제동이 적절히 혼합되어 추종함을 알 수 있었다. 이는 혼합제동시의 제동작용순위가 설계요건을 만족함을 도출할 수가 있다.

셋째로 혼합제동 시뮬레이션과 속도-제동력 출력을 분석한 결과 구동차 및 부수차의 혼합제동력의 특성을 파악함으로써 향후 제동시스템 개발에 필요한 설계 파라미터를 유추할 수 있는 개발품 제작이전에 혼합제동을 해석할 수 있는데 많은 도움을 줄 수 있다.

참고문헌

- [1] 건설교통부, 도시철도차량 표준사양, 1998. 2
- [2] 철도학회 춘계학술대회, 전동차의 혼합제동 제어 방법에 관한 연구 2000. 4.
- [3] 한국철도기술연구원, 전동차 표준사양 연구보고서 1997. 12.
- [4] 서울시 지하철 7, 8호선 정비지침서 유진기공(주)
- [5] Dynamics J. L. Meriam, 1981
- [6] System Dynamics Okata
- [7] Feedback Control system