2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

도시철도차량의 제동제어장치 개발에 관한 연구

이 우 동
한국철도기술연구원

A Study on the Development of Brake Control Unit for Urban Transit

Lee Woo-Dong
Korea Railroad Research Institute

Abstract - The blending brake is mixed brake system which is operated by electrical and mechanical brake simultaneously. Most of urban transit system is used with blending brake unit. In order to train is align at the stopping position, The blending brake shall be presicely operated to the train. Many parameters are influence on the train when train is stopped on presicion position by blending brake. It is considered such parameters as decceleration, variable load, jerk, friction cofficient, etc. Therefore, This paper consider the parameter and describes the blending control for standard EMU. The control algorithm of it is proposed and simulation of it carried out by using MATLAB. Also Electronic control unit is manufactured with micro procesor which is configured fot blending control and is verified by performance test.

1. 서 론

전동차의 안전운행에 있어서 제동작용의 역할은 매우 중요하다. 디젤기관차나 객차와 같은 열차는 제동장치가 단순히 정지하는 기능을 수행하면 되었으나 전동차와 같은 도시철도차량이 도입되면서 점차 안전성 및 쾌적성이 강조되게 되었다. 이를 위하여 전동차의 제동장치는 기계적인 방법으로 작동되는 단순한 구조에서 마이크로프로세서에 의하여 전기제동 및 마찰제동을 혼합하여 작동되는 혼합제동방식의 구조로 변화되고 있는 추세이다. 전동차의 제동작용은 정상운전시에 사용되는 상용제동과 비상운전시에 사용되는 비상제동으로 구분되어 있다. 상용제동시에는 전기제동 및 마찰제동을 혼합하여 제동작용을 수행하는 혼합제동을 통하여 차량을 정지시킨다. 전동차는 일반적으로 구동차(M Car)와 부수차(T Car)로 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 이의 특성에 따라 열차의 정위치제어에 있어 다른 결과가 나타나기도 하였다. 따라서 전동차의 안전성과 성능을 확보하고 정위치 정차를 위하여는 정확한 혼합제동을 구현하는 것이 무엇보다도 중요하다. 따라서 본 연구는 제동작용시에 열차의 정위치에 영향을 주는 혼합제동에 관한 제어방법을 연구하고 이를 실제 제어장치로 제작하여 실제 전동차에 설치하여 시험함으로써 궁극적으로는 전동차의 쾌적성, 성능 및 안전성 등을 확보하는 제동제어장치를 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 본 론

2.1 도시철도차량의 제동장치

도시철도차량의 제동장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 제동제어기, 제동작용장치, 공기압축기, 제동실린더 및 공기배관 등으로 구성되어 있다. 상용제동시에는 주간제어기 및 ATC에서 발생한 제동지령이 CC를 통하여 ECU로 전송되고 ECU에서는 제동지령과 응하중신호를 검지하여 필요한 요구제동력을 계산하고 Inverter에 전기제동을 지령한다. 요구제동력을 전기제동이 만족하지 않으면 ECU는 Tc Car에 마찰제동력을 지령하고 부족분을 M Car의 마찰제동으로 보충하는 혼합제동을 수행한다.

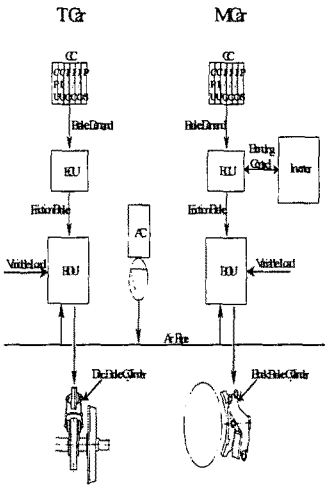


그림 1 도시철도차량의 제동장치 구조[1]

2.2 혼합제동 제어방법

혼합제동이란 부수차 및 구동차를 1유니트로 하여 도시철도차량을 정지시킬 때 구동차의 전기제동을 우선하여 작용하고 전기제동이 부족하면 부수차 및 구동차의 마찰제동을 작용시켜 도시철도차량을 정지시키는 제동을 말한다. 혼합제동시에 제동작용순위는 다음과 같다.

- 제동초기
  구동차 및 부수차 : 마찰제동
- 유니트 요구제동력 < 전기제동력
  구동차 및 부수차 : 전기제동
- 구동차 요구제동력 < 전기제동력 < 유니트 요구제동력
  구동차 : 전기제동,
  부수차 : 전기제동 + 마찰제동
- 전기제동력 < 구동차 요구제동력
  구동차 : 전기제동+마찰제동,
  부수차 : 마찰제동
- 전기제동력 실패시
  구동차 : 마찰제동,
  부수차 : 마찰제동

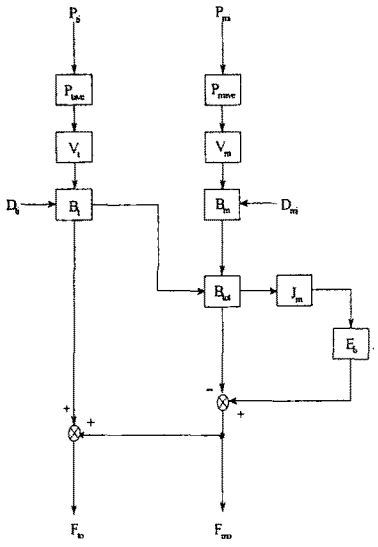


그림 2 도시철도차량의 혼합제동 제어블록도[4]

제동감속도 파라미터, 응하중 파라미터, 및 저크한계파라미터 등을 고려하여 시스템을 설계하여 제동력이 제동성능기준에 의해 계산된 제동력을 발생하면 이 시스템은 정밀정지를 위한 제어시스템이 설계되었다고 정의할 수가 있는 것이다. 그림 2[2]는 이러한 파라미터를 고려한 혼합제동 제어개념을 도식화 한 것이다.

대차의 공기스프링에 설치되어 있는 압력센서에 의해 공기압력이 검출되며 이 압력은 공전변환기에 의해 전압신호로 변환되어 제동제어장치로 입력된다.

이 신호 (P_{ti}, P_{mi})는 한 차량에 4개가 설치되어 있으므로 공기압을 평균하여야 한다.

부수차의 공기압력 평균값

$$P_t = \frac{P_{t1} + P_{t2} + P_{t3} + P_{t4}}{4} \quad (2\text{-}1)$$

구동차의 공기압력 평균값

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

차량의 중량을 계산하기 위하여 공기스프링의 단면적에 차량의 질량을 곱하고 여기에 회전관성질량계수를 곱하면 식 (2-3) 및 (2-4)와 같다.

$$V_t = \eta_t \cdot P_t \cdot A_t$$

$$= (1.06) \cdot P_t \cdot \frac{\pi \cdot d_t^2}{4} \quad (2\text{-}3)$$

$$V_m = \eta_m \cdot P_m \cdot A_m$$

$$= (1.14) \cdot P_m \cdot \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \quad (2\text{-}4)$$

차량에 설치되어 있는 열차제어감시장치에서 제동제어장치로 1~7스텝별로 0.5km/h/s~3.5km/h/s[3]의 감속도 지령 (D_{ti} D_{mi})이 입력된다.

따라서 감속도 지령에 따라 계산되는 구동차 및 부수차의 요구제동력은 Newton의 제2법칙

$F = m \cdot a$에 의해 계산된다.

$$B_t = V_t \cdot D_{ti} \quad (2\text{-}5)$$

$$B_m = V_m \cdot D_{mi} \quad (2\text{-}6)$$

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

$$B_{tot} = B_t + B_m \quad (2\text{-}7)$$

합산된 총요구제동력은 혼합제동우선순위에 의하여 전기제동이 먼저 작용하도록 추진제어장치에 전기제동을 요구하게 된다. 전기제동을 요구하기 전에 차량의 승차감을 확보하기 위하여 저크제한기능을 추가하였다. 제동장치 설계기준에서 저크제한기준은 0.8 m/s^3[5]이므로 일정한 시간지연을 갖고 최대감속도로 도달하게 하여야 한다. 즉 1.2125초의 시간지연을 갖도록 설계하는 것이다. 이를 위하여 스텝신호로 입력되는 제동요구신호를 램프신호로 바꾸기 위해 적분제어기를 추가하였다. 여기에다 이득게인을 적용하여 그림 3과 같이 저크제한기준을 만족하도록 설계하였다.

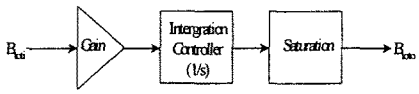


그림 3 저크제어 블록선도

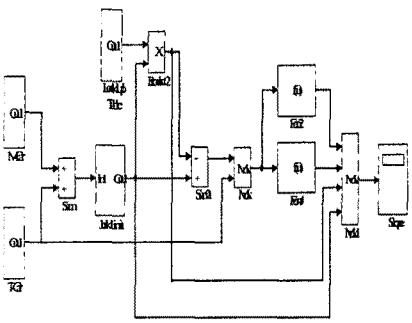


그림 4 혼합제동 시뮬링크

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

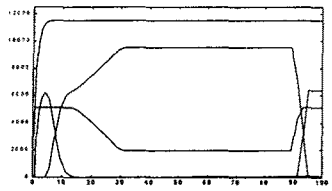
실제로 본 연구에서는 회생특성을 기존도시철도차량에서 측정되었던 전기제동달성치를 적용하여 매트랩에서 시뮬레이션하였다. 제동제어장치는 총요구제동력에서 추진제어장치에서 수신한 전기제동달성신호를 감하여 마찰제동을 수행하게 되는데 혼합제동 우선순위에 따라 부수차의 마찰제동을 먼저 작용시키기 위해 부수차의 제동작용장치에 마찰제동력신호 (F_{t0})를 출력시킨다. 부수차의 마찰제동력으로도 총요구제동력을 만족하지 못할 경우에는 구동차의 마찰제동을 작용하기 위하여 구동차의 제동작용장치에 마찰제동력신호 (F_{mo})를 출력시킨다.

이 혼합제동과정을 매트랩의 시뮬링크를 이용하여 제어블록선도를 작성하여 그림 4와 같은 혼합제동에 관한 시뮬링크를 구현하였다.

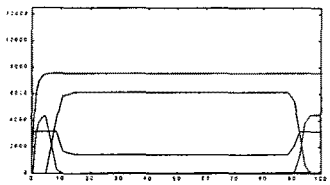
2.3 시스템 해석 및 결과

혼합제동 제어블록선도를 매트랩의 시뮬링크를 이용하여 시뮬레이션한 후에 그 결과를 그래프로 출력하면 그림 5와 같은 결과가 나타난다. 그래프로 출력되는 선도를 고찰하면 요구제동력, 전기제동, 부수차의 마찰제동

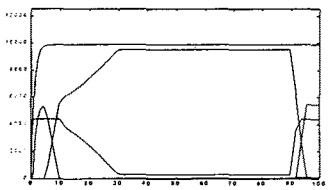
및 구동차의 마찰제동이 적절히 혼합되어 작용함을 볼수가 있으며 이는 혼합제동 설계요건을 만족하고 있다. 제동초기에는 전기제동이 작용하지 않으므로 부수차 및 구동차의 마찰제동으로 요구제동력을 만족하다가 전기



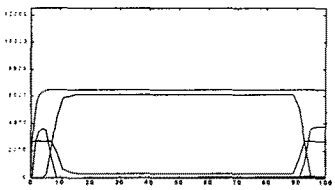
6스텝 공차



7스텝 만차



7스텝 공차

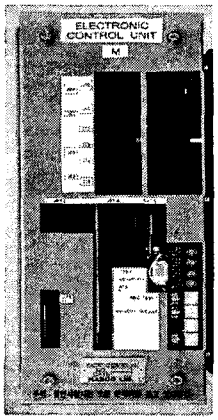


6스텝 만차

그림 5 도시철도차량의 혼합제동 작용선도

제동력이 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 도시철도차량의 제동균형을 맞추기 위하여 부수차의 마찰제동력이 우선하여 작용하고 부족분을 구동차의 마찰제동력으로 보충하도록 시뮬레이션 하였다.

2.4 혼합제동 제어장치 개발



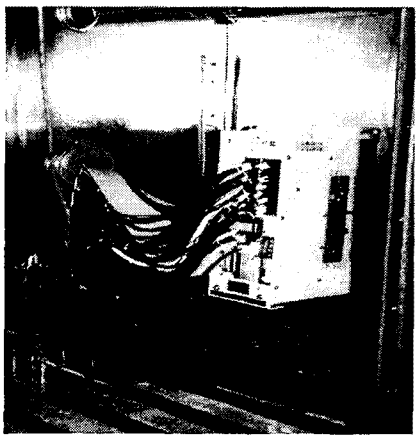


그림 6 혼합제동제어장치 후면 및 형식시험

제동제어기능을 수행할 수 있는 전자제어장치를 국내에서 개발하였으며 이 혼합제동 제어장치를 개발하기 위하여 저크기능, 응하중기능, 혼합제동기능 및 기타 제동작용에 필요한 기능들에 대한 제어블록선도를 작성하였고 이 제어블록선도를 이용하여 혼합제동 및 제동제어와 관련된 항목들에 대하여 플로우차트(Flow Chart)를 작성하였으며 이를 소프트웨어로 구현하였다. 소프트웨어는 16비트 마이크로프로세서의 하드웨어로 구현되어 제작되었으며 품질인증기준에 따라 표 8 및 그림 19와 같이 상온, 고온 및 저온에서 형식시험을 수행하여 성능 및 기능이 개발사양을 만족함을 보여주었다.

2.5 제동성능시험결과 및 고찰

제동성능시험은 경북 상주에 있는 1.3km의 직선평탄선로에서 도시철도차량을 왕복주행하는 방법으로 실시하였으며 시험장비를 설치하여 차트래코더를 통하여 그 결과를 출력하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 처음에 저크파라미터로 요구제동력이 램프신호로 출력되는 것을 볼 수가 있으며 제동초기에는 요구제동력에 따라 마찰제동력이 순간적으로 작용하다가 전기제동력이 최대로 작용하면서 마찰제동력이 작용하지 않는 것을 볼 수가 있다. 제동력에 의해 차량이 정지상태로 들어가면 전기제동은 급감하고 이를 마찰제동이 보충하는 것을 알 수가 있다. 이 그래프는 혼합제동 제어선도를 매트랩의 시뮬링크로 분석한 결과와 유사한 그래프를 나타내고 있다.

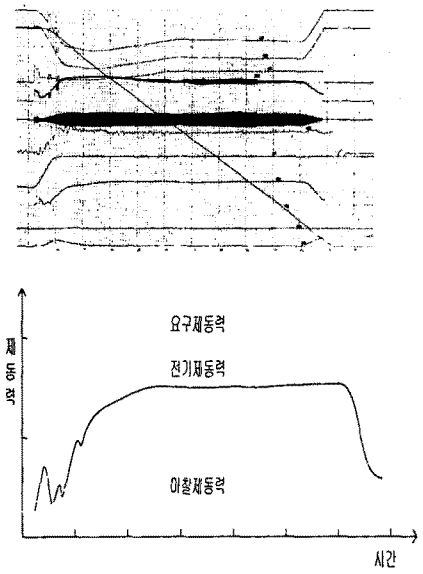


그림 7 차트레코더를 통한 혼합제동 출력선도

3. 결 론

도시철도차량의 혼합제동은 구동차의 전기제동과 구동차 및 부수차의 마찰제동을 적절히 혼합하여 사용하는 제동이다. 이 혼합제동의 궁극적인 목적은 에너지 절감에 있다. 그러나 에너지를 절감하는 반면에 제어방법에 따라 도시철도차량의 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 제동장치 성능시험결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째로 혼합제동에 직접 영향을 주는 제동파라미터는 응하중, 감속도 및 저크파라미터임을 도출하였다. 이들 파라미터들은 도시철도차량의 정밀정지에 직접적으로 영향을 주므로 정확한 측정과 제어를 수행해야 한다.

둘째로 혼합제동 시뮬레이션과 제동성능 시험결과의 출력을 분석한 결과 요구제동력에 따라 전기제동과 마찰제동이 적절히 혼합되어 추종함을 알수 있었다. 이는 혼합제동시의 제동작용순위가 설계요건을 만족함을 도출할 수가 있다. 이 시험결과로서 구동차 및 부수차의 마찰제동력 측정센서의 설치를 보완하고 전기제동에 대한 특성에 대한 연구를 보완하면 시뮬레이션과 거의 동일한 시험결과를 유추할 수 있다는 것을 도출할 수 있고 이는 개발품 제작이전에 혼합제동을 해석할 수 있는데 많은 도움을 줄 수 있다.

셋째로 혼합제동 제어장치를 개발함으로써 핵심장치의 국산화가 이루어졌다. 따라서 철도분야의 기반기술에 일익을 담당하게 되었고 도시철도차량의 안전 및 성능을 확보하고자 하는 소기의 목적을 달성하게 되었다.

[참 고 문 헌]

[1] Brake Engineering Terms and Data Knorr-BREMSE(1995)
[2] Engineering Problem Solving with MATLAB D. M. Etter(1993)
[3] 유진기공(1996) NABCO 제동장치 정비 지침서
[4] Bernard Friedland(1986) Control System Design
[5] 건설교통부(1997) 도시철도차량 표준사양