

자동운전 전동차의 속도제어기법에 관한 연구

변운섭*, 장동욱, 김길동, 한영재, 이재관**
 철도연, 철도연, 철도연, 충북대

A study on the speed control method of automatic operation train

Yeun-Sub Byun, Dong-Uk Jang, Gil-Dong Kim, Young-Jae Han, Jae-Kwan Lee
 Korea Railroad Research Institute, Chungbuk National Univ**

Abstract - An automatic operation of train is executed by an automatic train operation(ATO) system. The main function of ATO system is to control train speed as well as train brake system. So that train can stop at its programed position on platform and run with passenger comfort. In this paper, the gain scheduled control is designed for speed control considering the disturbances. The simulation is executed to verify the speed control performance and to compare its performance with the conventional PI and general Fuzzy control.

차감을 고려한 가속속도 및 저크한계를 갖는다.

2.2 열차의 동적모델

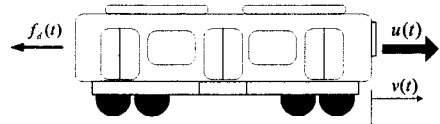


그림 1 열차모델

열차의 관성을 무시하고 저항력이 속도에 비례하여 열차의 움직임을 방해한다고 가정하면, Newton의 법칙에 근거하여 단순히 질량과 제동자 시스템으로 그림 1과 같이 볼 수 있다. 이에 대한 운동 방정식은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$M \dot{v}(t) + f_d(t)v(t) = u(t) \quad (1)$$

여기서 M 은 열차의 질량[kg], $f_d(t)$ 는 열차의 진행을 방해하는 저항[Nsec/m], $u(t)$ 는 열차 내에서 발생하는 견인력[N] 또는 제동력, $\dot{v}(t)$ 는 열차의 가속도[m/sec²], $v(t)$ 는 열차의 속도[m/sec]이다.

2.2.1 열차의 저항력

일반적으로 열차의 저항력은 식(2)와 같은 2차함수로 표현하여 적용하고 있다.

$$a + bv(t) + cv(t)^2 \quad (2)$$

하지만 식(2)에 의해서는 비선형적이고 순시적으로 발생하는 저항을 고려할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 저항을 순시적으로 발생하는 외란으로 가정하고 식(1)로부터 식 (3)의 외란추정자를 구하고 순시적으로 외란을 추정한다.

$$\hat{f}_d(t) = [u(t) - M_0 \dot{v}(t)]/v(t) \quad (3)$$

여기서, M_0 : 설계시 고려되는 열차의 공칭 무게

2.3 ATO 알고리즘 구성

제어기 구성은 그림 2와 같이 크게 속도profile생성기, 추종제어기, 외란 추정기로 구성된다.

2. 본 론

2.1 추진시스템

전동차의 추진시스템은 시스템구성에 따라 다를 수 있지만 전기적인 힘을 물리적인 힘으로 변환하는 전동기, 그 구동전력을 조절하고 변환시키는 인버터, 컨버터, 이를 제어하는 제어장치로 구성된다. 제어기는 요구되는 구동전력이나 제동력을 ATO시스템으로부터 받아 고성능의 제어를 실현한다. 제어기는 전동기를 구동시키기 위해 ATO시스템에서 받은 신호에 근거하여 인버터를 동작시킨다. 추진시스템은 ATO시스템의 지령에 근거하여 요구전력과 제동력을 발생시키는 펄스폭 구동시스템으로 구성된다. 또한 추진시스템은 열차의 성능과 승

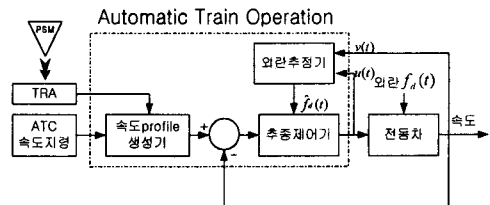


그림 2 열차제어 구성도

속도profile생성기는 열차의 성능한계 가속도와 승차감

을 위한 저크한계를 고려하여 속도 profile을 생성한다. 추종제어기는 앞서 속도profile생성기에서 발생한 속도 profile에 추종하도록 열차의 제어입력인 견인력과 제동력 지령을 발생한다.

2.3.1 속도profile생성기

2.3.1.1 추종속도 생성 알고리즘

열차는 운전중에 ATC(automatic train control)를 통해 트랙회로부터 속도지령을 받는다. 이때의 속도지령은 계단형태의 목표속도 값이다. 선로 구간 구간에서 이 산형태의 속도지령이 주어짐으로 현재열차의 속도에서 목표속도까지를 연결하는 선형적인 속도지령을 생성할 필요가 있다. 이때, 고려될 사항은 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 열차의 가속도성능한계 a_L 과 저크한계 J_a 를 만족하며 초기속도 v_0 에서 목표속도 v_f 로 가는 최적의 속도 profile을 생성하는 것이다. 우선 기본적인 것은 그림 3의 제일하단 저크profile을 2번 적분하여 제일상단의 속도 profile을 얻는다. 그러기 위해서 현재속도에서 목표속도까지 가는데 필요한 저크profile을 구해야 한다. 이를 위해서는 $t_0 \sim t_3$ 각각의 시간을 정확히 알고 있어야 한다. t_0 는 목표속도지령을 받은 시각이다. t_1 는 다음과 같이 구한다. 주어진 저크한계를 1번 적분하여 가속도를 얻을 수 있다.

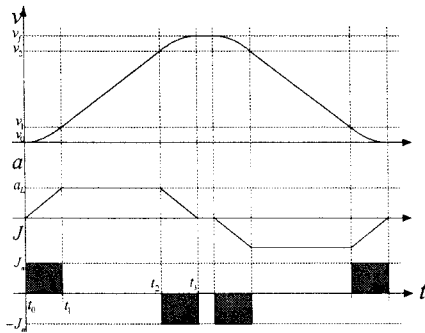


그림 3 속도 profile

$$a_L = \int_{t_0}^{t_1} J_a dt = [J_a t]_{t_0}^{t_1} = J_a t_{01} \quad (4)$$

식(4)에서 $t_{01} = a_L / J_a$ 이다. 여기에서 $t_{01} = t_{23}$ 로 한다. t_{12} 시간은 다음과 같이 구한다.

$a_L = \Delta v / \Delta t = (v_2 - v_1) / (t_2 - t_1) = (v_2 - v_1) / t_{12}$ 이 식에서 v_1 만 알면 t_{12} 를 구할 수 있다.

$$v_1 = \int_{t_0}^{t_1} J_a dt = \left[\frac{1}{2} J_a t^2 \right]_{t_0}^{t_1} = \frac{1}{2} J_a t_{01}^2 \quad (5)$$

$$v_2 = v_f - v_1 \quad (6)$$

따라서 $t_{12} = \frac{v_2 - v_1}{a_L}$ 로 구해진다.

결국 t_0 = 목표속도 수령시각

$$t_1 = t_0 + t_{01}$$

$$t_2 = t_0 + t_{01} + t_{12}$$

$$t_3 = t_0 + t_{01} + t_{12} + t_{23}$$

으로 결정된다. 이 시간정보로 열차의 가속한계 및 저크한계를 만족하며 현재속도에서 목표속도로 가기 위한 그림 3의 하단 저크 profile을 구할 수 있고 이를 두 번 적분함으로써 상단의 속도 profile을 구할 수 있다.

2.3.2 퍼지시스템을 이용한 추종 제어기

퍼지 추론 시스템은 Mamdani형 퍼지 추론을 이용하여 제어기를 설계하였다. 퍼지 추종 제어기는 그림 4와 같은 3단계로 구성되어 있다.

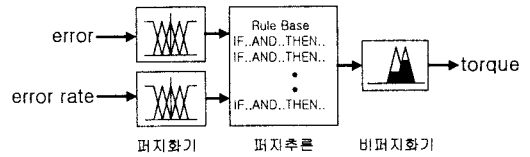


그림 4 퍼지 제어기의 내부 구조

2.3.2.1. 입출 변수의 퍼지화

열차 자동 운전에서 퍼지 제어기의 입력은 지령속도와 실제속도와의 오차와 오차의 변화율을 입력으로 사용된다. 그에 대한 출력변수는 토크이다. 두 입력 변수 및 출력토크의 퍼지화는 이등 삼각형법을 이용하였고, 이들 멤버십 함수 형태는 그림 5와 같은 형태로 정의하였다.

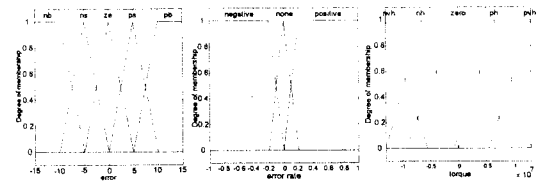


그림 5 오차, 오차의 변화율, 토크에 대한 멤버십 함수

2.3.2.2. 퍼지 추론 과정

퍼지 룰 베이스는 if-then 형태의 규칙으로 구성되어 있다. 오차와 오차변화율을 이용하여 토크량을 구할 때 이용되는 퍼지 규칙은 다음과 같다.

$$R^i : \text{If } e(k) \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e(k) \text{ is } B_i$$

$$\text{Then } T(k) \text{ is } C_{i,1}$$

$i=1, \dots, 15$ 는 제어 규칙 수

$j=1, \dots, 5$ 는 오차의 멤버십 함수의 수

$l=1, \dots, 3$ 는 오차변화율의 멤버십 함수의 수

표 1은 오차와 오차변화율에 따른 토크량의 변화를 나타내었다.

표 1 오차와 오차변화율에 따른 토크량의 변화

$e(k) \backslash \Delta e(k)$	nb	ns	ze	ps	pb
negative	nvh	nh	zero	ph	ph
none	nvh	nh	zero	ph	pvh
positive	nh	nh	zero	ph	pvh

2.3.2.3. 비퍼지화

aggregation과정을 통해 얻은 싱글 퍼지 집합을 언어학적 특성을 알맞게 매핑할 수 있는 하나의 값으로 나타내주기 위해서 일반적으로 많이 쓰이는 무게 중심법을 이용하였다. 식(7)과 같은 방법으로 토크량을 얻는다.

$$T(k) = \frac{\sum_{i=1}^n F_P(y_i)y_i}{\sum_{i=1}^n F_P(y_i)} \quad (7)$$

2.3.3. GS기법을 이용한 추종제어기

제어기를 구성하기 위해서 앞서 주어진 열차의 동력학 방정식(1)을 상태공간 모델식(8)로 표현할 수 있다.

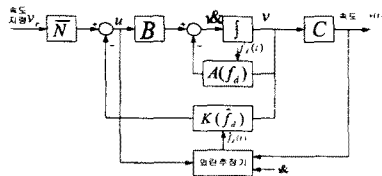


그림 6 GS-극배치 제어기

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_d(t)/M \\ 1/M \end{bmatrix} v(t) + \begin{bmatrix} 1/M \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (8)$$

제어기는 이득계획제어(gain scheduling control)기법을 응용하여 그림 6과 같이 설계하였다. 시스템의 출력에 영향을 주는 외란 $f_d(t)$ 를 이득계획변수로 선정하였다. 이 외란은 직접적으로 측정할 수 없는 변수이므로 식(1)로부터 외란의 추정자를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{f}_d(t) = [u(t) - M_0 \dot{x}(t)] / v(t)$$

추정에 사용되는 각 변수는 시스템출력으로 항상 측정되고있는 상태변수로 속도 $v(t)$, 가속도 $\dot{x}(t)$, 시스템에 가해지는 입력 $u(t)$ 등이다. 여기서 M_0 는 제어기 설계시 사용되는 열차의 공칭 무게이고 \bar{N} 는 정상상태 오차를 제거하기 위한 행렬이다. 제어게인 $K(\hat{f}_d(t))$ 는 다양한 선형제어 기법을 이용하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 극배치(pole placement)기법을 적용하여 설계하였다. 우선 페루프 시스템의 특성방정식을 식(9)와 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \Delta(s) &= \det[sI - (A(\hat{f}_d) + BK(\hat{f}_d))] \\ &= s + (\hat{f}_d/M_0 - K(\hat{f}_d)/M_0) \end{aligned} \quad (9)$$

그리고 원하는 극 배치에 의해 구해진 특성방정식은 식(10)과 같다

$$\Delta^*(s) = s + p \quad (10)$$

$\hat{f}_d/M_0 - K/M_0 = p$ 식을 만족하는 제어게인은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K(\hat{f}_d) = \hat{f}_d - pM_0 \quad (11)$$

결국 제어입력은 $u(t) = v, \bar{N} - u(t)K(\hat{f}_d)$ 이다.

2.3.4 시뮬레이션 결과

본 논문에서 적용한 열차 시스템 사양은 표 2와 같다.

표 2 열차시스템 사양

항목	사양
차량편성	8량 Tc-M1-M2-T1-T2-M1-M2-Tc
편성차량최대중량	공차:272[ton], 만차:432[ton]
최고운행속도	80[km/h]
가속도	3.0[km/h/s](정지→35[km/h])이상
저크한계	0.8[m/s ³]이하

시뮬레이션은 고전제어기법인 PI제어기법과 현대제어기법인 이득계획제어에 의한 극배치기법 그리고 Fuzzy 제어기법을 제시하고 적용하였다. PI제어기에서 적용한 PI 게인은 P:300000, I:2000로 설정하였고, 극배치기법에서 극의 위치는 -2로 하였다. Fuzzy 제어기에서는 표 1에 쓰여진 규칙과 그림5에 나타나 있는 멤버쉽함수를 이용하였다. 외란 $f_d(t)$ 은 $2 \times 10^4 \sin(2\pi t)$ [Nsec/m] (± 55.5 [kN] : 10[km/h])를 적용하였다. 열차는 40[km/h]까지 최대 400[kN]의 토크를 갖는 것으로 하였다. 시뮬레이션시 열

차의 무게는 만차432[ton]을 적용하였다.

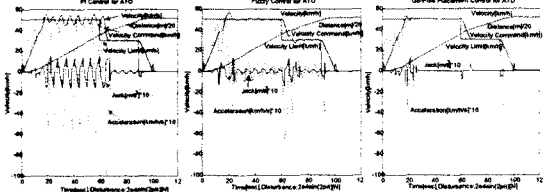


그림 7 외란적용시 각 제어기의 제어성능

외란이 없는 상태에서 속도지령에 따른 PI제어와 GS-PP제어, Fuzzy 제어의 출력특성곡선으로 세가지 기법은 정상조건에서의 설계사양인 가속도, 감속한계, 저크한계를 모두 만족하고 하였고 제어성능의 차이가 없었다. 그림 7은 외란이 가해진 상태에서의 제어특성곡선으로 PI제어에서는 속도가 심하게 출렁이고 있고 Fuzzy제어에서는 초반 과도시 큰 오버슈트가 발생하였지만, PI 제어보다는 대체적으로 나은 성능을 가지고 속도를 잘 추정해 나가고 있음을 볼 수 있고, GS-PP제어에서는 외란에 적용하여 초기과도시 약간의 출렁임 외에는 속도를 잘 추종하고 있다. 저크변화상태 또한 상당히 감소됨을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 열차의 성능한계와 승차감을 고려한 제한조건 하에서 열차가 목표하는 속도에 도달하기 위한 속도 profile 설계기법을 제시하였다. 또한 미지의 주행저항을 고려하여 열차가 속도 profile을 추종하도록 하는 속도 추종제어기를 설계하였다. 그 외 고전제어기법인 PI제어와 현대제어기법인 퍼지제어와 그 제어성능은 비교하였다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 동일한 조건의 주행저항에 대해서 고전제어기법인 PI제어나 Fuzz 제어보다 제시한 극배치 이득제어기가 목표속도추종 측면에서 우수한 성능을 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국철도기술연구원, "자동차열차운전장치 연구개발", 종합제어장치 연구개발보고서, 1998, 12
- [2] Shih-Jer Huang, Shang-Lin Her, "Fuzzy Control of Automatic Train Operation System" International Journal of Modelling and Simulation, Vol 17, No2, 1997
- [3] An ANSALDO Affiliated Company, "PRODUCT DEVELOPMENT ENGINEERING INTERNAL TECHNICAL REPORT OTIS Automatic Train Operation INSTALLATION AND TESTING" 10/01/1998.
- [4] W.J.Rugh, "Analytical framework for gain scheduling," IEEE control systems Vol.11, No.1, pp. 79-84, 1991
- [5] Addison-Wesley "Control Tutorials for Matlab" <http://www.engin.umich.edu>