

미지의 주행저항을 고려한 도시철도차량 ATO의 속도추종 및 정밀정차 제어

The speed regulation and fixed point parking control of urban railway ATO considering unknown running resistance

변윤섭* 한성호** 김길동** 백광선** 한영재*
Byun, Yeun-Sub Han, Seong-Ho Kim, Gil-Dong Baik, Kwang-Sun Han, Young-Jae

ABSTRACT

An automatic train operation(ATO) system executes the operation of constant speed travelling and fixed point parking by using microprocessors instead of driver's manual operation. This paper describes the mathematical model for the train considering unknown disturbances which consist of start resistance, travelling resistance, slope resistance, curve resistance, and so on. The speed controller of ATO system is designed by considering the disturbances. The simulation is executed to verify the speed control and fixed point parking performance and to compare its performance with that of a PID-type ATO control system under disturbances. Simulation results show that the control performance of gain scheduled control scheme for ATO system is better than that of the conventional PID controller.

1. 서 론

도시철도차량의 ATO시스템은 열차의 기동 및 가감속시 승차감조절, 목표속도추종, 역내의 정밀정차 등을 목적으로 전동차의 자동운전 및 무인운전을 수행하기 위한 열차내의 주요한 부속시스템이다. 현재 ATO를 위한 다양한 방법들이 발표되고 있다. 고전적인 제어기법인 PI제어부터 인공지능 및 퍼지제어기법을 응용한 다양한 기법들이 제시되고 있다. 이렇게 제시되고 있는 대부분의 기법들에서 열차저항을 속도에 따른 2차함수 형태의 일반화된 수식을 적용하고 있다. 하지만 열차진행에 영향을 주는 요소는 출발저항, 주행저항, 구배저항, 곡선저항 이외에 기후나 온도 조건에 따른 레일의 마찰저항 변화, 승객이나 화물량의 증감에 따른 열차무게의 변동 등 다양한 형태의 외란이 열차운행 중에 발생하여 실제 열차저항과 일반화시킨 열차저항과는 순시적으로 상당한 오차가 있을 수 있다. 이런 연유로 일반적인 열차모델 및 제어기에 의해서는 임의의 외란에 대해 정밀한 제어기능을 수행하기가 힘들다. 따라서, 본 논문에서는 임의의 외란을 고려한 열차모델을 구성하고 순시적으로 발생하는 외란에 적극적으로 대처할 수 있도록 비선형 제어기법 중 이득계획제어 기법을 응용하여 속도 추종제어기를 구성하고 기존에 폭넓게 사용되어온 PI제어기법과 그 제어성능을 비교 평가하였다.

* 한국철도기술연구원 정회원 주임연구원

** 한국철도기술연구원 정회원 선임연구원

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 페루프 구동시스템으로 구성된다. 또한 추진시스템은 열차의 성능과 승차감을 고려한 가감속도 및 저크한계를 갖는다.

2.2 열차의 동적모델

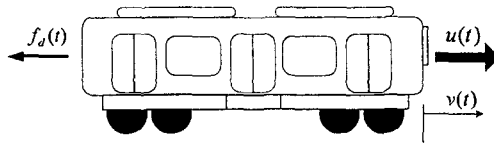


그림 1. 열차모델

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 전동기에서 발생하는 견인력[N], $\dot{v}(t)$ 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.

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

2.3 ATO 알고리즘 구성

제어기 구성은 그림 2와 같이 크게 추종profile생성기와 추종제어기 두 부분으로 구성된다.

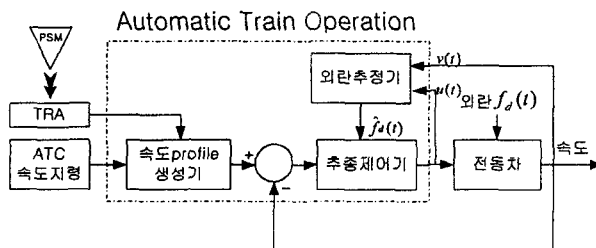


그림 2. 열차제어 구성도

추종profile생성기는 열차의 성능한계 가속도와 승차감을 위한 저크한계를 고려하여 속도 profile을 생성한다. 추종제어기는 앞서 추종profile생성기에서 발생한 속도 profile에 추종하도록 열차의 제어입력인 견인력과 제동력 지령을 발생한다.

2.3.1 속도profile생성기

2.3.1.1 속도추종 알고리즘

그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 가속도성능한계 a_L 과 저크한계 J_a 가 주어지면 초기속도 v_0 에서 최종속도 v_f 로 가는 최적의 속도profile을 생성할 수 있다. 우선 기본적인 것은 그림 3의 제일하단 저크곡선을 2번 적분하여 제일상단의 속도profile을 얻는다. 그러기 위해서 현재속도에서 목표속도까지 가는데 필요한 저크profile을 구해야 한다. 이를 위해서는 $t_0 \sim t_3$ 각각의 시각을 정확히 알고 있어야 한다. t_0 는 목표속도지령을 받은 시각이다. t_1 은 다음과 같이 구한다. 주어진 저크한계를 1번 적분하여 가속도를 얻을 수 있다.

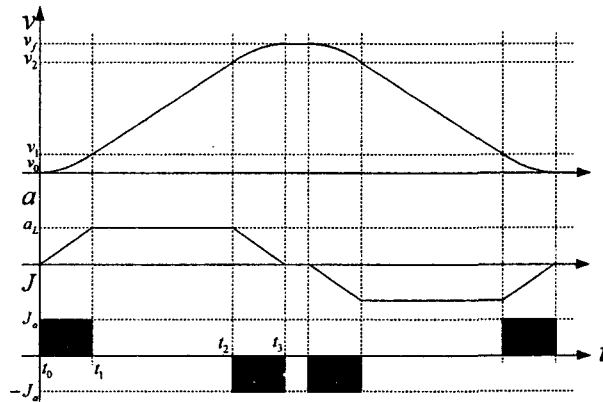


그림 3. 속도 profile

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

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.

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

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

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

결국 $t_0 =$ 목표지령속도 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.

2.3.1.2 정밀정차 알고리즘

전동차는 역내 정밀정차를 수행하기 위해서 운행 중 차상장치인 TRA(Trigger Receiver Assembly)를 통해 PSM(Precision Stop Marker)를 검출 받는다. 전동차는 역으로 진입하면서 PSM 1, 2, 3, 4등 4개의 PSM을 접하게된다. 이들의 위치는 역에 정차하는 위치로부터 그림 4와 같이 위치하고 있어 ATO는 이들 정보를 이용하여 정밀정차를 수행하게된다. 정차시 열차는 정차지점의 $\pm 30\text{cm}$ 이내에 위치하여야한다.

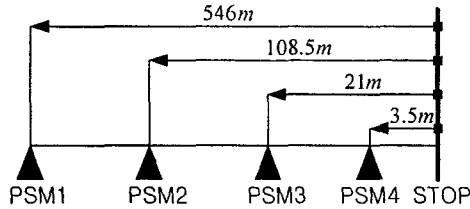


그림 4. PSM 위치

정밀정차를 수행하기 위해 생성하는 속도 프로파일은 그림 5에서 설명하고 있다. 정차시 속도 프로파일이 따라야 하는 제약조건으로는 감속한계 $d_L : 3.5\text{km/h/s}$ (상용제동) 이상을 넘어서면 안되며, 저크한계 $J_a : 0.8\text{m/sec}^3$ 또한 지켜야 한다. 본 논문에서는 그림 5와 같은 속도생성 프로파일 알고리즘을 적용하였다. 이에 필요한 수식을 정리하면 다음과 같다. 여기서 S_f 는 PSM2로부터 정차위치까지의 거리 108.5m이다. v_f 는 PSM2를 만난 시점 t_0 에서 열차의 속도이다. 정밀 정차를 위한 속도프로파일 생성은 PSM2로부터 시행하는 것으로 하였다.

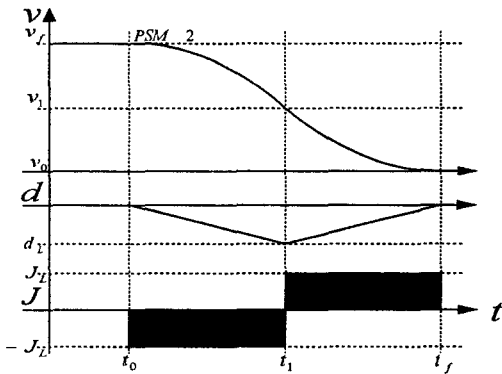


그림 5. 정밀정차 속도 profile

$$d_L = J_L t_1 \quad (7)$$

$$v_1 = \int d_L dt = J_L t_1^2 / 2 \quad (8)$$

$$S_f = v_f t_f / 2 \quad (9)$$

$$t_1 = t_f / 2 \quad (10)$$

$$v_1 = v_f / 2 \quad (11)$$

여기서 구해야 할 것은 PSM2를 접한 시점 t_0 에서 $-J_L$ 을 유지해야하는 시간 t_1 과 감속한계 d_L 을 넘지 않게 하는 J_L 을 구해야 한다. 우선 식(9)에서 $t_f = 2S_f/v_f$ 이고 식(10)에 의해 식(12)과 같이 구해진다.

$$t_1 = S_f / v_f \quad (12)$$

또한 식(8)로부터 식(13)을 구할 수 있다.

$$J_L = 2v_1 / t_1^2 = v_f / t_1^2 \quad (13)$$

식(12)과 식(13)을 이용하여 식(14)을 만족하는 v_f 값을 선정한다.

$$d_L = J_L t_1 \quad (14)$$

위 식에 따라 구해진 값 $v_f \approx 36.974\text{km/h}$ 이다. PSM2에서 전동차의 속도가 구해진 속도값 36.9km/sec 내에만 들어오면 전동차를 저크한계와 감속도 한계 내에서 정밀정차 가능하다. 따라서 열차가 PSM1을 만나면 PSM2에서 열차의 속도가 v_f 이내에 들도록 속도추종 알고리즘을 적용하고 PSM2를 만나면 정밀정차 알고리즘을 수행한다. PSM2를 만난 시점 t_0 에서의 t_1 까지 $-J_L$ 값을 두 번 적분하여 상단의 속도 프로파일을 얻고 t_1 부터 t_f 까지는 J_L 를 두 번 적분하여 속도프로파일을 얻는다.

2.3.2 추종제어기

제어기를 구성하기 위해서 앞서 주어진 열차의 동력학 방정식(1)을 상태공간 모델식(15)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{v}(t) &= [-f_d(t)/M][v(t)] + [1/M][u(t)] \\ y &= [1][v(t)] \end{aligned} \quad (15)$$

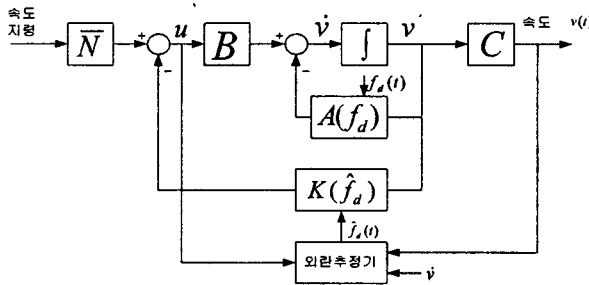


그림 6. GS-극배치 제어기

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 변수임으로 식(1)로부터 외란의 추정자를 다음과 같이 구할 수 있다.

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

추정에 사용되는 각 변수는 시스템출력으로 항상 측정되고있는 상태변수로 속도 $v(t)$, 가속도 $\dot{v}(t)$, 시스템에 가해지는 입력 $u(t)$ 등이다. 여기서 M_0 는 제어기 설계시 사용되는 열차의 공칭 무게이고 \bar{N} 는 정상상태 오차를 제거하기 위한 행렬이다. 제어기인 $K(\hat{f}_d(t))$ 는 다양한 선형제어 기법을 이용하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 극배치(pole placement)기법을 적용하여 설계하였다. 우선 페루프 시스템의 특성방정식을 다음 식(16)과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \Delta(s) &= \det[sI - (A(\hat{f}_d) + BK)] \\ &= s + (\hat{f}_d/M_0 - K/M_0) \end{aligned} \quad (16)$$

그리고 원하는 극배치에 의해 구해진 특성방정식은 다음식(17)과 같다

$$\Delta^*(s) = s + p \quad (17)$$

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

$$K = \hat{f}_d - pM_0 \quad (18)$$

2.3.3 시뮬레이션

표 1. 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
감속한계	3.5[km/h/s]이하 (상용제동)
저크한계	0.8[m/s ³]이하

본 논문에서 적용한 열차 시스템 사양은 표 1과 같다. 시뮬레이션은 고전제어 기법인 PI제어기법과 현대제어기법인 이득계획제어에 의한 극배치기법(GS-PP)을 제시하고 적용하였다. PI제어기에서 적용한 PI 게인은 P:300000, I:2000으로 설정하였고, 극배치 기법에서 극의 위치는 -2로 하였다. 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 열차의 무게는 만차432[ton]을 적용하였다. PSM1을 접했을 경우 추종해야할 속도 $v_f=30$ km/h로 설정하였다,

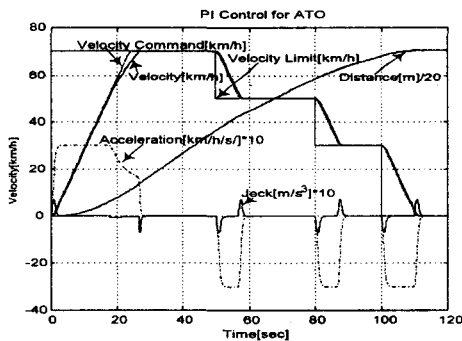


그림 7. PI제어에 의한 속도추종

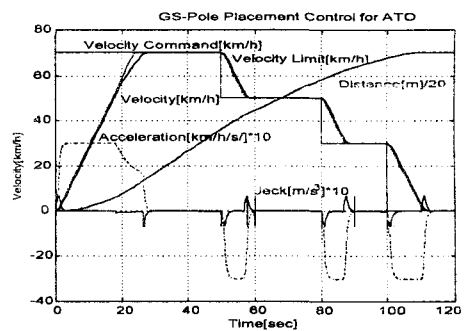


그림 8. GS-PP기법에 의한 속도추종

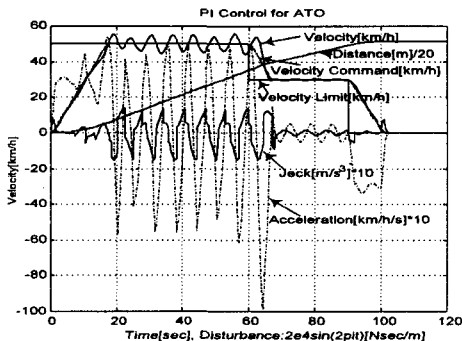


그림 9. 외란적용시 PI제어특성

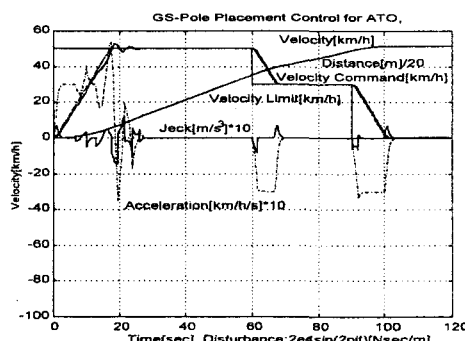


그림 10. 외란적용시 GS-PP 제어특성

그림 7과 8은 외란이 없는 상태에서 속도지령에 따른 PI제어와 GS-PP제어의 출력특성곡선으로 둘은 거의 같은 제어특성을 보인다. 그림 9와 10은 외란이 가해진 상태에서의 제어특성곡선으로 PI제어에서는 속도가 심하게 출렁이고 있다. 반면 GS-PP제어에서는 외란에 적응하여 초기과도시 약간의 출렁임 외에는 속도를 잘 추종하고 있다. 저크변화상태 또한 상당히 감소됨을 볼 수 있다.

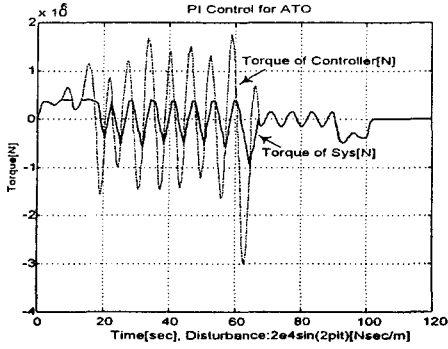


그림 11. 외란적용시 PI제어 요구토크

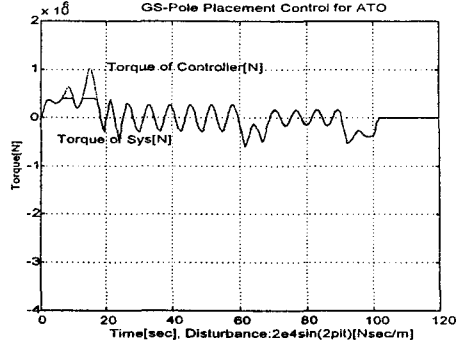


그림 12. 외란적용시 GS-PP 요구토크

그림 11과 12는 제어기가 요구하는 토크곡선과 시스템출력 토크곡선으로 PI제어에서는 외란에 따라 그 오차가 상당히 존재하고있고 GS-PP기법에서는 초기과도상태에서 약간존재 후 오차를 볼 수 없다.

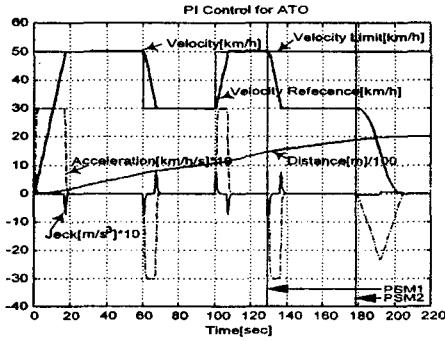


그림 13. PI제어
속도추종 및 정밀정차

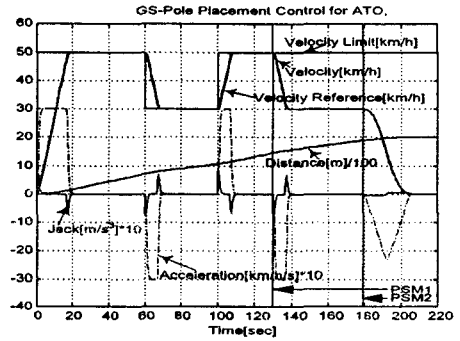


그림 14. GS-PP
속도추종 및 정밀 정차

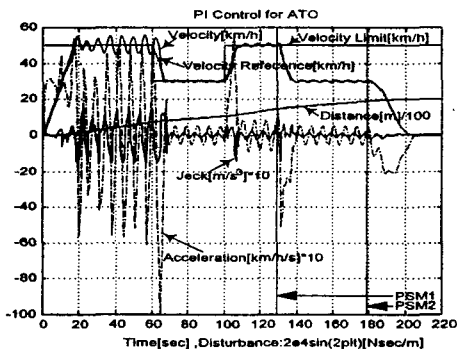


그림 15. 외란적용시 PI제어
속도추종 및 정밀정차

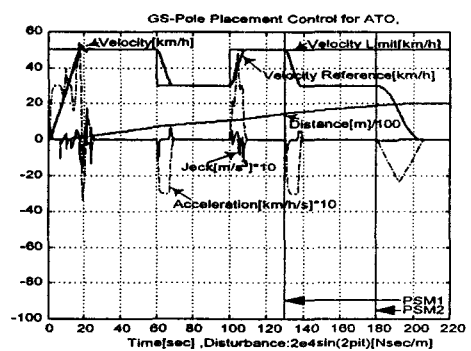


그림 16. 외란적용시 GS-PP
속도추종 및 정밀정차

그림 13과 14는 외란이 적용되지 않은 상태에서 속도추종 및 정밀정차를 수행한 것으로 주행거리의 2km이다. 이때 수행결과 PI제어에 의해서는, 2000.0089m이고 GS-PP에 의해서는 2000.0163m로 나타났다. 그림 15와 16은 외란이 적용된 상태에서 속도추종 및 정밀정차 수행결과이다. 그림 15에서 보듯

이 PI제어는 외란에 대해 속도의 출렁임, 저크, 가감속도 등의 심한 변동을 보여주고 있으며 정차거리는 2003.11m로 정차지점 허용오차 $\pm 30\text{cm}$ 를 크게 벗어나 있다. 그림 18은 동일한 외란 조건에서 이득 계획제어 극배치기법을 적용한 결과로 초기 가속구간에서 만 속도와 가감속도의 출렁임이 보이고 이후에는 안정적인 움직임을 볼 수 있으며 정차거리는 1999.98로 정밀정차시 외란에 큰 영향을 받지 않았다. 동일한 조건에서 요구되는 제어입력의 RMS값에서 볼 수 있듯이 PI제어보다 GS-PP에서 보다 적은 제어입력을 요구했다. 그 결과는 표 2와 같다.

표 2 시뮬레이션 결과

조건 \ 제어	정차거리(목표거리:2000m)		제어입력의 RMS	
	PI	GS-PP	PI	GS-PP
외란 비적용	2000.0089	2000.0163	1.5340e+5	1.5246e+5
외란 적용	2003.1126	1999.9869	2.3420e+5	2.0869e+5

3. 결 론

시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제시한 극배치 이득제어기가 목표속도추종 및 에너지 효율측면에서 우수한 성능을 보였다. 동일한 조건의 외란에 대해서 고전제어기법인 PI제어보다 외란에 강인한 극배치 이득제어기법을 제시하였다. 외란에 대한 속도추종능력의 우수성은 역내 정밀정차 및 배차시각 축소, 역간 이동시 소요시간 오차감소 등 열차 운행에 유리한 면을 제공할 것이다.

참고문헌

- [1] 한국철도기술연구원, “자동열차운전장치 연구개발”, 종합제어장치 연구개발보고서, 1998, 12
- [2] Shih-Jer Huang 외, “Fuzzy Control of Automatic Train Operation System” International Journal of Modelling and Simulation, Vol 17, No2, 1997