

전동열차의 운행에너지 절감을 위한 최적 운행 패턴 모델링

김정현*, 이세훈**, 전상표***

Modeling of the Optimal Operation Pattern for Energy Saving of The Trains

Jung-Hyun Kim*, Se-Hoon Lee**, Sang-Pyo Jun***

요약

본 논문에서는 고정된 구간 거리를 정해진 운전 시분내에 주행에너지를 최소화하며 주행하는 열차의 특성을 파악하고 수학적으로 모델링한다. 도시철도차량 자동주행에 일반적으로 사용되는 PID제어기 대신 목표값에 추종하면서도 자동 주행 중 소비에너지가 최소화되도록 최적제어기를 사용하여 철도 차량을 모델링하였으며 실제 동일한 운행조건하에서 설계한다. 실제 선로 조건을 적용하여 별도의 차상장치나 선로주변시설 없이도 자동운전 중 주행에너지를 최소화하여 주행에너지를 절감하고자 한다. 따라서 8호선 실 노선 구간별 운전시분 내에서 실측 데이터를 분석을 위해 직선구간/구배구간/곡선구간 등 구간을 선정하고 그 구간에서 열차의 운행패턴에 따라 에너지를 절감하는 열차운행을 방법을 제시하였다.

▶ Keywords : 최적운행, 운행에너지, 운전시격, 역행

Abstract

In this paper, Minimize driving energy for operation within a defined distance yeokgan fixed time-resolved and determine the nature of the train is traveling, and to model mathematically. Urban rail car cruise in general by the PID controller is used instead of automatically tracking a target value while traveling in energy consumption to be minimized by using optimal control model railroad charyangreul was designed under real operating conditions the same. The actual track conditions apply to the minimum value or a separate listing of cars around the track facility without a driving energy of the automatic operation and to reduce the driving energy. Therefore, actual route chosen straight line 8 / gradient segment / curve for the measured data analysis, such as sections within the city-minute drive each section and presented

•제1저자 : 김정현 •교신저자 : 이세훈, 전상표

•투고일 : 2014. 12. 1, 심사일 : 2014. 12. 5, 게재확정일 : 2014. 12. 10.

* 서울시도시철도공사(Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation)

** 인하공업전문대학 컴퓨터시스템학과(Dept. of Computer Systems & Eng. Inha Tech. University)

*** 남서울대학교 정보통신공학과(Dept. of Information & Communication Eng. Namseoul University)

how the trains to save energy, depending on the pattern of the train station in the region.

▶ Keywords : Optimal driving, Driving energy, Operation Interval Time, Powering

I. 서 론

현재 자동운전(ATO : Automatic Train operation)은 열차의 안정성과 신뢰성을 바탕으로 PID제어기가 적용되어 제어기준 값(목표속도)과 피드백 값(실제속도)간의 오차에 의한 비례계수, 미분계수, 적분계수를 보상하여 열차에 필요한 역행(Powering)/제동(Braking) 명령 값을 계산한다. PID 제어기를 이용한 도시철도 차량의 자동/무인운전에서는 목표속도를 추종하기 위해 전동차량의 역행과 제동을 반복함으로써 에너지 효율이 수동운전보다 주행 소비에너지가 작다고 알려져 있다. 이에 열차의 운행 시 소비되는 에너지를 줄이기 위하여 PID제어, 최적제어, 퍼지제어, 유전자 알고리즘 제어 등 다양한 제어기법을 열차제어에 적용하여 에너지를 줄이고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다[1][2].

도시철도 시스템 운영에 있어 에너지절약 방법에는 여러 가지가 있으며, 본 논문에서는 자동운행 제어에 사용되는 PID 제어기를 최적제어기로 설계하여 주행에너지를 최소화할 수 있는 열차 운행 패턴을 모델링하고자 한다. PID 제어기는 하나의 제어인자(기준값)만 제어할 수 있는 반면에 최적제어기(Linear Quadratic)는 두 가지 제어인자(기준 값, 주행에너지 최소)를 제어할 수 있다. 전동열차의 모델링을 통해 열차의 역간 자동 주행제어에 최적제어기를 적용하여 제어 기준 값을 추종하면서도 주행 에너지가 최소화 되도록 제어하고 설계된 최적제어기의 주행 소비에너지가 기존의 운전방식에 비해 얼마나 효과가 있는 지 알아보하고자 한다[3][4].

II. 관련연구

1. 열차운행제어 시스템

1.1 개요

자동 운전 장치(ATO : Automatic Train operation)는

선로상의 정해진 위치에 있는 지상설비 장치로부터 간헐적인 정보를 받는 결합이 없는 안전한 장치로서 전차의 자동운전 기능을 제공하기 위함이다. 이 시스템 목적은 안전한 주행, 승객의 편안함, 최상의 운전방법으로 시간과 에너지를 절약하는데 있다. 자동운전은 가속과 제동뿐만 아니라 역에서의 검지제어를 승무원의 조작 없이 행할 수 있다. 운전자는 단지 역에서의 출발만을 시작하면 된다. 열차의 ATO 운전은 지상 설비 장치로부터 수신된 메시지에 의해 제어된다. ATO는 또한 ATC(Automatic Train Control)와 상호작용 되며, ATC는 ATO 명령에 우선하며 비상 상황이 발생하면 제동을 체결할 수 있게 된다. ATO장치는 종래에 승무원이 수동으로 행하던 역간 운전, 열차정차, 출입문제어, 열차출발, 안내방송 등을 최신의 컴퓨터 기술과 소프트웨어 기술을 결합시켜, 열차운행상태를 TTC에서 감시 하므로 속달되거나 속달되지 않은 승무원에 관계없이 안전한 열차운전이 가능하도록 자동화한 설비를 말한다[5][6].

1.2 전동열차의 주행패턴

일반열차와 달리 수도권 전동열차는 역간거리가 짧고 정차역이 많아 역행과 제동을 빈번히 반복해야 하는 특성을 가지고 있다. 일반열차의 정차역간 운전시간이 최소 15분 이상 된다면 전동열차는 최소 1분에서 길어야 3분 정도에 이르는 실정이다.

일반열차의 경우 일단 한번 가속하게 되면 최고속도로 계속 주행하여 역간의 평균속도가 대단히 높게 되는데 전동열차의 경우 역간거리가 짧기 때문에 최대한 빨리 가속하고 최대한 빨리 감속해야만 역간 평균속도를 높일 수 있다.

따라서 전동열차는 무엇보다 뛰어난 가속 성능을 가져야만 많은 승객을 최대한 빨리 수송할 수 있게 된다.

현재 주력 차종인 VVVF인버터제어 전기동차는 1량당 최대 승객하중 20(ton)일 때 0(km/h)에서 35(km/h)까지 가속도 3.0(km/h/s)를 일정하게 유지하며, 상용 만 제동시 감속도 3.5(km/h/s), 비상 제동시 4.5(km/h/s)의 제동 성능을 보유하고 있다. 지하철 대부분의 역간에서 전동열차는 역행-타행-제동의 단순한 운행 패턴을 적용하고 있고, 역간거리

가 길 경우 상·하 구배에 따라 역행-타행-역행(제동)-타행-제동의 패턴으로 운행되고 있다.

2. 열차의 운전모드와 열차의 저항

2.1 열차의 주행 중 운전모드

전동열차는 가선으로부터 공급받은 전기적 에너지를 견인전동기에 공급하고 견인전동기는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시켜 열차를 가속하게 된다. 이때 소비되는 에너지는 열차가 주행 시 소비하는 에너지의 대부분을 차지하며 역행시의 에너지소비를 줄이는 것이 열차의 주행에너지를 절감하는 관건이 된다. 역행(powering)시의 소비에너지는 열차의 가속도와 최고속도에 의해 좌우되는데 운전시각이 짧고 정차역의 수가 많아 역행(powering)운전모드와 제동(braking)운전모드를 수시로 반복해야 하는 전동열차의 특성상 가속도는 열차가 낼 수 있는 최고의 가속도를 이용하여 열차를 운전하게 된다. 따라서 주어진 운행조건 - 고정된 역간거리와 정해진 운전시분을 만족하는 범위에서 최고속도를 낮추어 운전하는 것이 주행시 소비되는 에너지를 절감하는 주요한 방법이 된다. 또한 운행중 여유 운전시분이 발생하면 이를 활용하여 역행시의 최고속도를 낮출 수 있으므로 주행에너지를 더욱 절감할 수 있게 된다.

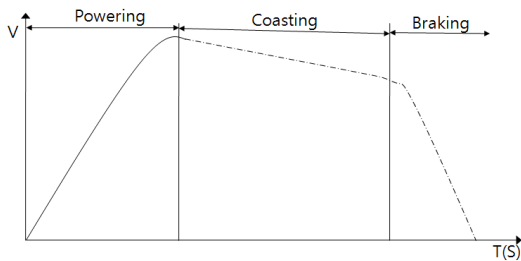


그림 1. 열차의 주행모드
Fig. 1. Train of Driving Mode

열차의 주행을 위해 공급된 견인에너지(Traction Energy)는 열차를 궤도상의 일정한 지점까지 주행시키고 타행의 시작은 공급된 에너지가 열차의 운동에너지와 위치에너지로 저장되면서 궤도위에서 타력으로 주행하는 것을 말한다. 타행을 시작하게 되면 열차의 운동에너지는 주행저항, 곡선저항, 구배저항 등 열차의 운동을 방해하는 저항성분들에 의해 점차 손실되어 결국 0이 되면서 일정지점에 정차하게 될 것이다. 결국 열차가 타행을 시작하면 추가의 에너지 공급이 없어도 열차가 궤도 위를 주행하는 것이 되므로 이는 곧 열차의 주행에너지를 절감하는 것이 된다. 역행시의 가속도를 얼마로

하느냐가 주행에너지 소비의 큰 변수이나 기본적으로 고가속·고감속 운전은 해야 하는 전동열차의 특성상 가속도는 열차가 낼 수 있는 최대의 가속도를 이용하는 것으로 하면 결국 역행시 최고속도를 몇 km/h까지 가속할 것인가를 결정하는 것이 바로 주행에너지를 얼마나 소비하게 되는지를 결정짓는 가장 중요한 변수가 된다는 것이다(7)(8)(9).

2.2 주행저항(Running Resistance) 및 구배저항(Gradient Resistance) 및 곡선저항(Curve Resistance)모델

전동열차의 주행저항 R_R 은 지하구간에서 식(2.1) 같다.

$$R_R = 1.867 + 0.0359V + 0.000745V^2 \text{ [kgf/ton]} \quad (2.1)$$

여기서, V 는 열차의 속도 [km/h]

이러한 열차의 운전속도에 열차의 총 중량을 곱하면 열차의 주행을 방해하는 요인으로 작용하므로 주행저항이라 한다. 견인력곡선에서 알 수 있듯이 역행 시에는 주행저항만큼의 견인력이 더 필요하고 제동 시에는 주행저항이 제동력과 같은 방향으로 작용하므로 요구되는 전체 제동력에서 주행저항만큼 빼주게 된다. 구배저항은 열차가 구배 상에 있게 될 때 중력의 영향을 받아 상구배에서는 역행 시 $F(-)$ 성분이 되고, 하구배에서는 $F(+)$ 성분이 되는데 그 크기는 식(2.2)와 같다.

$$R_g = -W \cdot \tan(\alpha) \approx -W \cdot \sin(\alpha) \text{ [kgf]} \quad (2.2)$$

여기서, α 는 구배의 각도

W 는 열차의 중량 [ton]

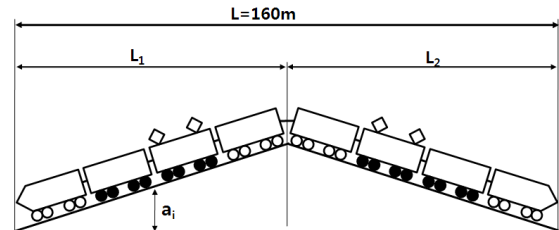


그림 2. 구배저항
Fig. 2. Gradient Resistance

또한 열차의 길이가 160[m]정도 되므로 열차가 상이한 구배에 걸쳐서 운행되는 그림 2에 나타나듯 각각의 구배에

걸친 열차의 중량을 계산하여 전체 구배저항을 구하게 된다. 따라서 각각 서로 다른 구배에 걸친 열차의 구배저항은 식(2.3)으로 표현된다.

$$R_g = -W \frac{1}{L} \cdot \sum l_i \cdot \sin(\alpha_i) \text{ [kgf]} \quad (2.3)$$

여기서, W는 열차의 하중[ton]
 L은 열차의 전체 길이[m]
 l_i 는 각각의 구배에 걸친 열차의 길이[m]
 α_i 는 각각 천분율의 구배

곡선저항은 구배저항과 마찬가지로 곡선 상에 진입하는 길이에 따라 그 저항을 계산해 주어야하며 곡선에 완전히 진입한 열차의 곡선저항은 다음 식(2.4)와 같다.

$$R_c = \frac{600 \sim 800}{r} W \text{ [kgf]} \quad (2.4)$$

여기서, R은 곡선반경[m]

2.3 3 상 유도전동기의 VVVF 제어

현재 전동차에 많이 사용되고 있는 3상 유도전동기는 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)의 제어 방법을 사용하여 속도제어를 하며 3상 유도전동기의 회전자 속도를 구하는 것은 아래의 식(2.5)와 같다.

$$N = (1-s)N_s = (1-s) \frac{120f}{P} \quad (2.5)$$

여기서, s는 슬립
 P는 극수

3상 유도전동기의 속도를 제어하기 위해서는 식(2.5)에서 나타나듯 회전속도는 주파수에 비례하고 극수는 반비례한다. 따라서 속도제어 방법으로 극수나 혹은 주파수를 변환하는 방법이 사용된다. 그러나 극수는 바꾸는 것이 불연속제어가 되며 또는 극수를 변환하는 것이 곤란하므로 따라서 일반적으로는 전원주파수를 가변 하여 속도를 제어하는 방법을 주로 사용한다.

$$T = k_1 \Phi \cdot I_m = k_2 \left(\frac{V_m}{f} \right)^2 \cdot f_s = k_3 \frac{V_m I_m}{f} \quad (2.6)$$

여기서, T는 전동기 토크
 V_m 은 전원전압

위 식(2.6)은 유도전동기의 회전력(T)를 나타내는 것으로 3상 유도전동기의 공급전압(V_m)이 변하면 회전력이 이에 따라서 변하게 된다. 즉, 공급전압(V_m)이 커지면 T(Torque)도 커지게 된다. 따라서 이를 통하여 3상 유도전동기의 토크-속도 특성곡선은 그림3과 같다.

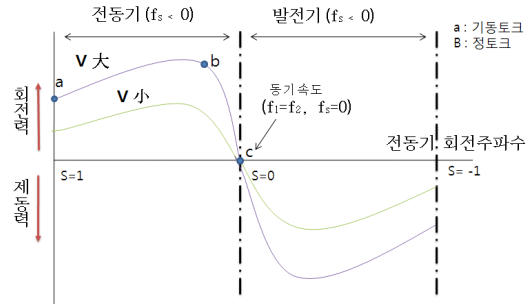


그림 3. 유도전동기의 속도-토크 특성곡선
 Fig. 3. Speed-torque characteristic curve of the Induction Motor

전원전압이 커지면 Torque가 커지기도 슬립주파수 f_s 가 회전자 속도보다 크면 전동기가 역행시이고 슬립주파수가 회전자 속도보다 늦으면 발전기로서 동작됨을 의미한다. 여기서, 슬립주파수와 전동기 회전속도가 같은 지점을 동기속도라 한다. 발전에서는 회전자 속도는 동기속도보다 더 크며 회전자 주파수와 슬립주파수는 동일한 방향이고 슬립은 부(-)이다. 이것은 전력이 축으로부터 회전자 회로까지 환원된다는 것을 의미하며 전동기는 발전기처럼 동작한다. 이때 전동기는 전력을 환원하고 토크-속도 특성은 역행서 특성과 비슷하지만 부(-)의 토크 값을 가진다. 이것이 현재의 도시철도 회생제동을

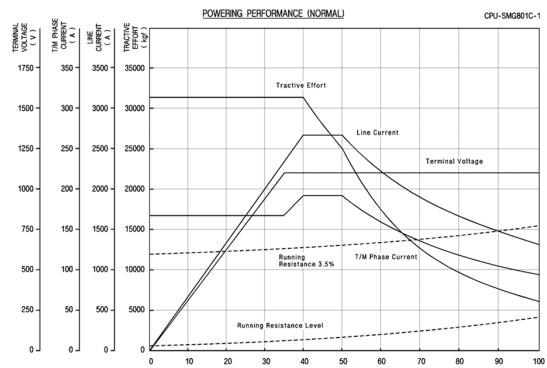


그림 4. 8호선 견인성능 곡선
 Fig. 4. Ling-8 Train Performance Curve

제어하는 기본이다. 즉 슬립주파수(f_s)를 제어함으로 회생제 동력을 얻게 된다[10][11][12].

유도전동기를 사용한 차량의 견인특성과 브레이크 성능은 다음 그림과 같다.

III. 전동열차의 최적 운행 패턴 모델링

1. 열차의 주행패턴

전동차는 선로의 여러 가지 조건, 차량의 특성, 운전시각의 단축을 위해 운행제어, 승차감 향상, 그리고 역간 주행에너지 소비의 감소 등 많은 것을 고려하면서 운전하게 된다. 선로의 조건이라 하면 역간의 거리, 구배, 곡선, 열차의 정지 위치, 그리고 정차시간을 등을 말하며 차량의 조건은 열차의 주행저항, 견인력, 제동력, 그리고 차량자체의 성능을 말한다. 운전조건은 완전주행모드, 타행주행모드 그리고 선로의 제한 속도 등을 말하는데 이러한 운전조건은 기관차뿐만 아니라 전동차를 포함한 모든 철도차량의 주행에 적용될 수 있다.

일반열차와 달리 도시철도 전동차는 역간거리가 짧고 정차역이 많아 역행과 제동을 빈번히 반복해야 하는 특성을 가지고 있다. 일반열차의 경우 일단 한번 가속하게 되면 최고속도로 계속 주행하여 역간의 평균속도가 대단히 높게 되는데 전동열차의 경우 역간거리가 짧기 때문에 최대한 빨리 가속하고 최대한 빨리 감속해야만 역간 평균속도를 높게 된다. 이러한 조건을 만족해 주행에너지를 최소화 하는 최적주행의 열차 운행패턴은 역행모드를 짧은 시간에 적용하면 주행에너지는 적게 소비되지만 운행속도가 낮아져 정해진 운전시분을 만족할 수 없게 되고 제동모드를 빨리 적용하면 정해진 거리를 만족할 수 없으므로 고정된 역간거리와 정해진 운전시분을 만족하는 타행모드의 시작점과 제동모드의 시작점을 결정하는 것이 최적주행을 결정하는 주요한 변수가 된다.

기본적으로 역행시간이 길어지면 최고속도가 높아지게 되고, 속도가 높아지면 역행시 에너지를 많이 소비하게 된다. 또한 역행시간이 길어지면 열차의 최고속도가 높아져 제동을 적용하는 시간도 동시에 길어지게 되는데 이것은 동일한 주행 시간 내에서 타행시간이 짧다는 것을 의미하고, 최고속도가 높아져 제동시 많은 에너지를 회생한다고 해도 회생 시 에너지가 역행 시에 소비한 에너지를 초과할 수는 없기 때문에 최고속도가 높으면 주행에너지를 많이 소비한다는 것을 예측할 수 있다. 결국 동일한 시간에 주행을 한다면 역행과 제동이 짧고 타행시간이 길어야만 속도를 낮추게 되고 이것이 곧 주

행에너지를 절감하는 전략이 된다.

그림 5의 1은 이상적인 주행패턴을 보여주고 있는데 가감속도의 기울기가 수직이라고 하면 운행시의 속도를 최고로 많이 낮출 수 있게 되나 이것은 현실로는 불가능하며, 주행패턴 2는 실현 가능한 최대의 가감속력으로 운전하는 경우를 말한다. 일반적으로 역행 시에는 기관사들이 가속도를 최대로 하여 운전하기 때문에 역행시의 가속도는 대부분 동일하게 되며, 제동시에는 기관사의 경험에 의해 서로 다른 감속도를 가지게 된다. 그러나 제동 감속도는 최대로 하는 것보다는 회생제동력이 최대가 되는 5단 또는 6단 제동을 사용하는 것이 효율적이기 때문에 주행패턴 3와 같이 운전하는 것이 가장 효율적이라 할 수 있다.

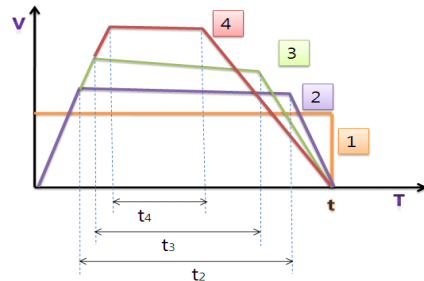


그림 5. 역행-타행-제동
Fig. 5. Powering-Coasting-Braking

주행패턴 4와 같이 제동 시 감속도를 더 낮추게 되면 동일한 시간 내에 주행하더라도 최고속도를 더욱 높여야 하므로 결국 주행에너지가 많게 된다. 최고속도를 낮추기 위해 가감속도를 높인다는 것은 결국 타행시간이 늘어난다는 것을 의미하며 타행시간 t_4 에서 t_2 로 갈수록 최고속도를 낮추게 된다. 그러나 운전시분에 여유시분이 없게 되면 최대 가속도로 하여 최고속도까지 운행속도를 높여 운전하게 되며, 기관사 개인에 따른 제동 감속도만이 달라진다. VVVF 인버터제어 전동열차는 역행 시에 최대의 가속도로 역행하고, 제동 시에 회생제동 최대의 제동력으로 제동을 체결하여 열차의 최고속도를 낮추면 열차의 주행 시 소비되는 에너지를 절감할 수 있게 된다.

그림 6은 역간거리가 길고 상구배가 존재할 경우 나타날 수 있는 역행-타행-역행-타행-제동의 운전패턴을 보여주고 있다. 그림에서 역행 시와 제동 시에 기울기가 같은 것은 동일한 가감속도로 운행한 경우를 보여주고 있으며 최초 역행시 최고속도를 더 높여 가속한 경우의 A' 패턴과 낮은 속도에서 타행을 시작한 A패턴을 보여주고 있다. 또한 제 역행의 시작점을 B로 할 수도 있고, B' 패턴으로도 할 수도 있어 그림 4

과 달리 다양한 패턴이 존재하게 된다.

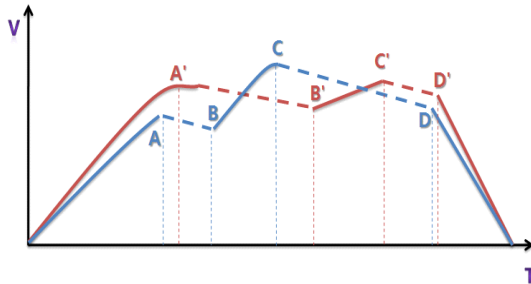


그림 6. 역행-타행-역행-타행-제동의 운행패턴
 Fig. 6. Powering-Coasting-Powering-Coasting-Braking Driving pattern

또한 출발역 출발 시에는 열차의 안전을 위하여 45(km/h)이하에서 제동감도 시험을 하게 되고, 반대방향 선로로 건널선을 지나갈 경우 전철기의 속도제한으로 제동을 체결하거나, 열차의 뒷부분이 전철기를 모두 빠져 나올 때까지 저속으로 운행하기도 한다. 이와 같이 이론이 아닌 실제 주행의 경우 운행시간도 달라지고, 선행열차와의 간격 등에 의한 차내 신호 현시상태에 따라 역행과 제동이 반복되는 등 운행 패턴에 다양한 변화를 보이게 됨에 따라 동일한 구간 내에서 운행하더라도 주행에너지는 많은 차이를 나타내게 된다.

2. 열차의 최적주행

열차를 운전하는데 있어 최적주행이라 하면 에너지절감, 정시확보, 승차감 향상 및 안전성 향상 등 여러 가지 조건을 모두 만족하며 운전하는 주행이라 할 수 있다. 승차감은 선로의 불규칙성, 급출발 및 급제동 등으로부터 기인할 수 있으나 전동열차는 열차를 차상컴퓨터 시스템에 의해 제어하기 때문에 기관사의 운전에 의한 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. 안전성은 분기부 등에서의 규정 속도 초과, 정지위치 정차 등 기관사가 열차를 운행하며 반드시 고려해야 할 사항이다.

정시확보는 승객과의 약속을 지키는 것은 물론 수송력 향상과 차량 운영효율 향상 등 운영측면에서도 대단히 중요한 의미를 지니게 된다. 그러나 차량의 속도가 빨라지면 운전시분은 단축되나 주행에너지는 전반적으로 커질 수밖에 없게 된다. 즉, 주행에너지를 절감하기 위해서는 기본적으로 운전시분을 늘려야 하나, 운전시분을 늘리면 수송효율이 저하되고, 차량 운영효율 또한 감소되어 오히려 비용이 증가하게 된다.

따라서 열차의 최적주행을 결정하기 위해서는 수송효율이나 차량 운영효율 등이 고려된 최적 운전시분이 결정되어야

하나 최적 운전시분에 대한 연구는 본 과제의 범위를 벗어나므로 측정된 평균 운전시분을 고려하여 열차지연이 최소화 되는 구간별 운전시분을 산정하고 이에 따라 최적주행을 결정하게 된다.

3. 열차의 주행에 따른 소비에너지

열차의 운동은 가해진 힘에 따라 대체로 평탄한 궤도를 따라 움직이는 하나의 질점의 운동으로 가정하고 다음 식(3.1)의 미분방정식을 만족한다.

$$v(t) = \frac{dx}{dt}$$

$$m\ddot{x} = F(t) - R(v(t)) + G(x(t)) \quad (3.1)$$

여기서, t는 시간

$x(t)$ 는 열차의 위치

$v(t)$ 는 열차의 속도,

m은 열차의 질량

$F(t)$ 는 열차에 가해진 힘의 성분

$-R(v(t))$ 는 주행저항

$G(x(t))$ 는 구배저항

만약 열차가 정차상태에서 출발한다면 $t=0$ 이고 도착시간이 $t=T$ 라면 $x(0)=v(0)=0$ 이 된다. 또한 $x(0)=0$ 이고 $t=\tau \geq 0$ 일 때 열차에 의해 주행된 거리는 식 (3.2)와 같다.

$$x(\tau) = \int_0^\tau v(t)dt \quad (3.2)$$

따라서 총 주행거리가 x 이면 $x(T)=x$ 가 된다.

열차에 가해진 힘 F 의 경우 양의 방향의 힘 F 와 음의 방향의 힘 F 로 구분되는데 $F(t) > 0$ 인 경우는 에너지가 열차에 공급되어 가속을 하는 경우이고 $F(t) < 0$ 인 경우는 제동에 의해 열차에 공급된 에너지가 소비되는 경우이다. 따라서 열차의 주행에 따른 전체 소비에너지 J (kWh)는 가속에 의해 소비된 양(+의 방향의 힘 $F_+(t)$ 에 의해 계산되며 식 (3.3)과 같다.

$$J = \int_0^T F_+(t)v(t)dt \quad (3.3)$$

단 제동 시 회생제동력 $F_-(t)$ 에 의한 회생에너지는 에너지가 다시 전차선으로 회생되므로 전체 소비에너지에서 빼서 계산하게 된다.

4. PID 제어기의 구조

PID 제어기는 다양한 구조가 있을 수 있으나, 크게 병렬 (Parallel Type Structure)과 직렬구조(Serial Type Structure)로 나눌 수 있다. 병렬구조의 경우 수식 전체가 용이하여 초기 PID 제어공학자들에 의해 선호된 방식으로 오차신호 $e(t)$ 와 제어입력 $u(t)$ 는 다음 식 (3.4)와 같다.

$$u(t) = K_{cp} \left(e(t) + \frac{1}{T_{ip}} \int_0^t e(t) dt + T_{dp} \frac{\partial e(t)}{\partial t} \right) \tag{3.4}$$

여기서, K_{cp} 는 비례이득
 T_{ip} 는 적분시간
 T_{dp} 는 미분시간

또한 PID 제어의 병렬 구조는 그림 7에서 나타나듯 P, I 및 D부분이 분리되어 있고 병렬로 연결된 형태이다. 이 형태는 이상적인 형태로 알려져 있으며 실제 구현하기 위해서는 직렬구조보다 많은 아날로그 증폭기(analog amplifier)가 필요로 하기 때문에 경제적인 이유로 산업 현장에서는 잘 사용되지 않는 형태이다.

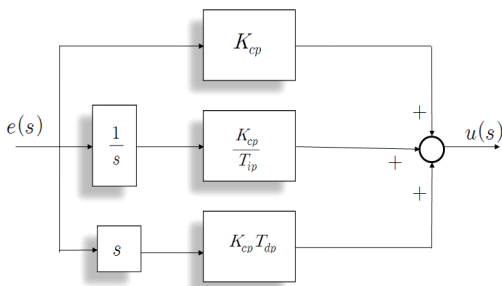


그림 7. 병렬구조의 PID 제어기
 Fig. 7. Parallel-type PID controller

반면에 직렬구조의 경우 오차신호 $e(t)$ 와 제어입력 $u(t)$ 는 식 (3.5)와 같다.

$$e_1(t) = e(t) + T_{ds} \frac{\partial e(t)}{\partial t}$$

$$u(t) = K_{cs} \left(e_1(t) + \frac{1}{T_{is}} \int_0^t e_1(t) dt \right) \tag{3.5}$$

직렬구조는 그림 8에서 보이는 바와 같이 병렬구조의 PID 제어기와는 달리 I와 D 부분이 분리되어 있지 않고 PI 제어기와 PD제어기가 직렬연결 된 것과 같은 구조이다. 이러한 구조는 아날로그 증폭기 수를 줄일 수 있어 실제적으로 많이 응용되고 있다.

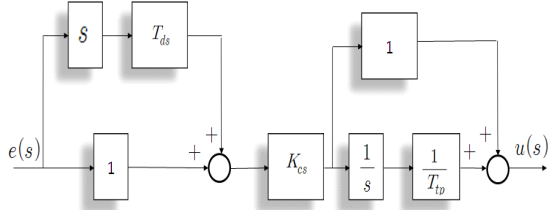


그림 8. 병렬구조의 PID 제어기
 Fig. 8. Serial-type PID controller

병렬구조와 직렬구조에 대한 PID 제어기 설계 파라미터간의 관계는 쉽게 구할 수 있다. 직렬 구조의 PID 제어기의 각 설계 파라미터로부터 병렬구조의 PID 제어기 설계 파라미터를 구하면 식(3.6)~식(3.8)과 같이 나타낸다.

$$K_{cp} = K_{cs} \frac{T_{is} + T_{ds}}{T_{is}} \tag{3.6}$$

$$T_{ip} = T_{is} + T_{ds} \tag{3.7}$$

$$T_{dp} = \frac{T_{is} T_{ds}}{T_{is} + T_{ds}} \tag{3.8}$$

반면, 병렬 구조의 PID 제어기의 각 설계 파라미터로부터 직렬 구조의 PID 제어기 설계 파라미터를 구하는 것이 항상 가능한 것은 아니나 $T_{ip} > 4T_{ds}$ 의 조건을 만족하는 경우에 한하여 다음 식(3.9)~식(3.11)과 같이 계산 된다.

$$K_{cs} = \frac{K_{cp}}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_{dp}}{T_{ip}}} \right) \tag{3.9}$$

$$T_{is} = \frac{T_{ip}}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_{dp}}{T_{ip}}} \right) \tag{3.10}$$

$$T_{ds} = \frac{T_{ip}}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4T_{dp}}{T_{ip}}} \right) \tag{3.11}$$

따라서 병렬 구조와 직렬구조는 상기와 같이 상호변환이 가능하다. PID 제어기는 세 개의 파라미터를 각각 비례이득 K_p , 적분시간 T_i , 미분시간 T_d 으로 표시하고 이에 따른 제어입력 $u(t)$ 는 식(3.12)와 같다.

$$u(t) = -K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \right) \quad (3.12)$$

IV. 실험 및 고찰

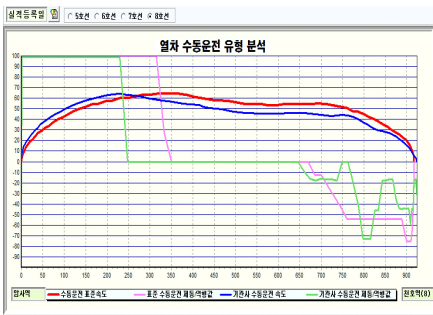


그림 9. 암사 - 천호역
Fig. 9. Amsa Station-Cheonho Station



그림 10. 천호역-강동구청역
Fig. 10. Cheonho Station-Gangdonggu-office Station

운전패턴에 따른 전력소비량을 분석하기 위하여 실노선 구간을 선정해 미리 준비해둔 주행패턴대로 실시하였다. 계획 운전시분 내에서 운전한 것으로 승객이 비혼잡 시간 /같은 시각 3회에 걸쳐 열차 주행 패턴을 다르게 하여 운전을 시행했다.

표 1 암사-천호 운전데이터
Table 1 Amsa - Cheon Driving Data

구분	A	B	C
구간	역간거리 1.3(km) - 소요시간 110초		
주행최고속도	74	68	60
역행시간(s)	29	27	22
표정속도(km/h)	33	32.5	30.5
소비전력량(kwh)	23.4	19.7	16.5

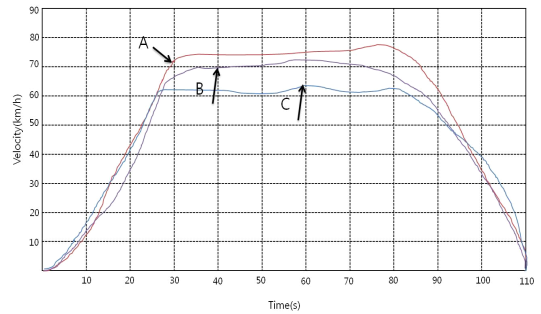


그림 11. 암사 - 천호 주행패턴
Fig. 11. Amsa - Cheonho Driving Pattern

표 2 천호역-강동구청역 운전데이터
Table 2 Amsa - Gangdonggu-office Driving Data

구분	A	B	C
구간	역간거리 1(km) - 소요시간 100초		
주행최고속도	69	63	58
역행시간(s)	27	24	20
표정속도(km/h)	32.5	31	30.5
소비전력량(kwh)	21.4	17.5	15.1

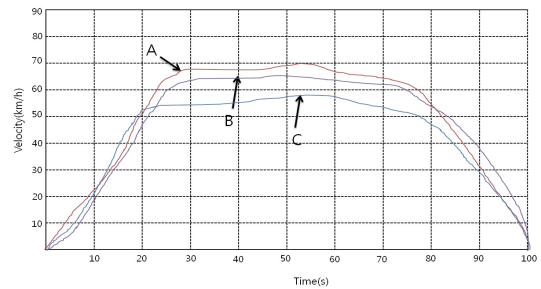


그림 12. 천호 - 강동구청 주행패턴
Fig. 12. Cheonho - Gangdonggu-office Driving Pattern

표 3 열차주행 패턴별 소비전력 비교
Table 3 Comparison of the Power Consumption of Train Driving Patterns

구분\ 주행패턴	A (kwh)	B (kwh)	C (kwh)	B 패턴과의 비교	
				A 패턴	C 패턴
암사 - 천호	23.4	19.7	16.5	19% 증가	17% 감소
천호- 강동구청	21.4	17.5	15.1	22% 증가	11% 감소

V. 결론

본 논문에서는 8호선 전동차의 구간별 적정 운전시분 이내에서 실측 데이터 분석을 통해 구간별 최적주행 패턴 2개를 제안했다. 암사-천호구간에서 B패턴과 비교했을 경우 A패턴은 평균 소비에너지 증가량이 19%였고 C패턴 감소량은 17%였다. 승차감 향상 및 주행에너지를 절감 할 수 있는 최적의 주행패턴은 B패턴이다. C패턴은 주행에너지를 절약할 수 있지만 감속도가 커서 승차감 저하되었고 에너지 효율측면에서 B패턴 보다 바람직하지만 표정속도가 낮아 열차 운행 고객서비스 측면이 저하되고 소요 차량 편성수에 영향을 미쳐 비용이 증가될 수 있다.

출발 후 역행(Powering)시간이 길수록 주행에너지 소비가 증가되었고 운행 중 타행시점을 먼저 선정하는 것에 의해 주행에너지가 감소되는 것을 알 수 있었다. 따라서 운행 중 승객의 승차차 시간 단축 등 여유 운전 시분이 생기면 최고속도를 낮추어 운행할 수 있고 이에 따라 주행 에너지를 줄일 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] J.H Kim, H.C Shin, Y.H. Choi, S.H Han, L.K Kim "Efficient Driving Pattern of the Railway Vehicles for Driving Energy Saving" Journal of The Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 61, No. 9, September 2012

[2] S.H Han, T.K Ahn, W.K Kim, Y.O Cho "A technique of Optimal train driving control to minimize energy consumption" Journal of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol A, pp.365-367, July 1998

[3] S.C Seok "Train operation control system of the Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation" http://www.krri.re.kr/webzine/y1999/m19/special/20030416/1_7044.html

[4] J.H Kim, S.H Kim, H.C Shin, S.H. Lee "Modeling of the driving pattern for energy saving of the railway vehicles" Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 19, No. 1, pp.107-108, January 2011.

[5] J.H Kim, H.C Shin, S.H Kim, S.H. Lee "Development of Train Operation Plan algorithm by using regression models" Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 19, No. 1, pp.23-24, June 2011

[6] H.C Shin, J.H Kim, S.H Kim "A Study for Applied In the Transfer of Train Information using RTD System" Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 19, No. 1, pp.109-110, January 2011

[7] Y.H Kim, D.H Kim, C.T Kim "A Study on the Selection of Train Operating Mode Minimizing the Running Energy Consumption" Journal of The Korean Society for railway, pp 32-37, Nov 2005.

[8] Y.B Joo, K.H Choi "A Simulation Study on the Energy Saving Strategy of Train Operation" Journal of The Korean Society for railway, Vol 15, pp. 1588-1592, November 2007

[9] G.H Tak, D.H Kim, C.T Kim " Study on the auto operation performance control of urban rail vehicle using an optimal control" Journal of The Korean Society for railway, pp. 20-25, Nov 2005

[10] Y.K Kim, S.Y Park, Y.S Park, I.B Jung, M.S Han " Investigation, analysis and study for urban transit's driving energy efficiency" Journal of The Korean Society for railway, pp. 612-618, May 2009

[11] S.H Han, T.K Ahn, W.K Kim, Y.O Cho" A technique of Optimal train driving control to minimize energy consumption" Journal of The

Korean Institute of Electrical Engineers, pp.
356-367, July 1998

[12] D.W Kim, M.T Cho, H.W Lee "Electric
Machine" Myoun-jin Press, 2008

저 자 소 개



김 정 현

2005: 건국대학교
전기공학과 공학사.

2011: 건국대학교
전기공학과 공학석사.

현 재: 서울도시철도공사 운영본부
관심분야: 임베디드시스템,
전기철도제어

Email : hyunie78@naver.com



이 세 훈

1985: 인하대학교
전자계산학과 이학사.

1987: 인하대학교
전자계산학과 이학석사.

1996: 인하대학교
컴퓨터공학과 공학박사

현 재: 인하공업전문대학
컴퓨터시스템과 교수

관심분야: 임베디드S/W
Email : seihoon@inhac.ac.kr



전 상 표

1985: 인하대학교
수학과 이학사.

1987: 인하대학교
통계학과 이학석사.

2000: 인하대학교
통계학과 이학박사

현 재: 남서울대학교
정보통신공학과 교수

관심분야: 데이터 마이닝
Email : spjun7129@naver.com