

현행 ATO 시스템 전동차 운행패턴의 문제점 분석을 통한 ECO 운행패턴 도출방안 연구

김규중 · 이근오* · 김주용**

대전광역시도시철도공사 · *서울과학기술대학교 안전공학과

**우송대학교 철도차량시스템과

(2012. 10. 29. 접수 / 2013. 3. 29. 채택)

ECO Driving Patterns Derived from the Analysis of the Problems of the Current Driving Pattern of Electric Multiple Unit in ATO System

Kyujoong Kim · Keunoh Lee* · Juyong Kim**

Daejeon Metropolitan Express Transit Corporation

*Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology

**Department of Railway Vehicle System Engineering, Woosong University

(Received October 29, 2012 / Accepted March 29, 2013)

Abstract : This study focuses on finding ways to derive train's optimal ECO driving pattern, which can improve the ride quality and reduce driving energy consumption with keeping the time interval between the stations. As research method, we compared difference of currently operating train's ATO and MCS driving patterns, and concentrated upon the things need to consider in simulation in order to improve the existing pattern of ATO driving pattern's issues with securing the train operation safety. Determining driving pattern minimizing energy consumption by controlling powering within speed limit and controlling switching to coasting at appropriate point considering the track conditions for each section, and determining braking control starting time considering ride comfort and precise stopping is considered to be most important.

Key Words : automatic train operation system(ATO system), ECO driving pattern, electric multiple unit(EMU), manual control supervision(MCS), variable voltage variable frequency Inverter(VVVF Inverter)

1. 서론

도시철도 ATO 시스템(Automatic Train Operation System) 전동차의 운행패턴은 견인력, 제동력, 승객하중조건, 저크, 구간별 운행시간 및 각종 열차저항 등을 고려하여 열차 주행에너지의 최소화 및 안전운행을 목적으로 해야 한다. 하지만 전동차의 주행에너지 소비를 절감시키고 승차감을 향상시킬 수 있는 최적의 ATO 운행패턴에 대한 연구 및 실제적인 적용사례는 아직까지 미비하다고 볼 수 있다.

따라서 급변 연구에서는 대전도시철도 1호선 전동차 4량을 대상으로 ATO 시스템의 운행 안전성과 신뢰성을 확보하고 주행에너지의 사용효율을 최적화할 수 있는 ECO 운행패턴을 찾는데 그 목적을 두었다.

연구방법으로는 현재 운행되고 있는 전동차의 자동·수동운전 운행패턴의 차이점을 확인하였으며 전동차 운행의 안전성을 확보하며 기존 ATO 운행패턴의 문제점을 개선하기 위하여 시뮬레이션 수행 시 고려해야 할 사항들을 중

점적으로 연구하였다. 특히 전동차의 비상제동 체결조건 의 하나인 속도초과가 일부 나타난 시뮬레이션 결과는 사용에너지의 효율이 높더라도 안전이 확보되지 않으므로 권고속도를 0.5 km/h씩 낮추며 시뮬레이션을 재실행함으로써 전동차 운행의 안전성을 확보하는데 노력하였다. 구간별 선로조건을 고려하여 제한속도 내에서 역행제어하고 적절한 지점부터 타행제어로 전환하여 에너지 사용량을 최소화한 주행패턴과 승차감과 정위치정차를 고려한 제동제어의 시점의 결정은 ATO 시스템이 추종할 수 있는 ECO 운행패턴을 도출하는데 가장 중요한 것으로 판단된다.

2. 현행 ATO 운행패턴의 고찰

2.1. ATO 제어의 특성

현재까지 개발된 대부분의 도시철도 전동차 ATO 시스템의 제어방식인 PID(Proportional, Integral, Integral)제어는 각 구간별로 계획된 운행시간 내에서 역행 및 제동명령을 계

*Corresponding Author: Keunoh Lee, Tel : +82-2-970-6381, E-mail : leeko@seoultech.ac.kr

Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongrungs-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

속하며 전동차를 제어해야 된다. 즉 속도제한조건 범위 내에서 생성되는 속도프로파일에 전동차의 실제속도가 추종하도록 ATO 시스템이 제어하므로 전동차 운행의 안전성과 신뢰성은 이루었으나, 주행에너지의 최소화 및 승차감 등 승차감은 거의 고려되지 않게 된다.

Fig. 1은 ATO 운행모드에서 ATO 시스템이 제어하고 있는 역행(powering), 제동(braking) 및 타행(coasting) 패턴을 나타내는 그래프이다.

산출된 속도프로파일에 맞춰 전동차를 운행하기 위하여 ATO 시스템은 VVVF Inverter(Variable Voltage Variable Frequency Inverter)장치에 끊임없이 역행 및 제동 명령을 주고 있다. 즉 속도제한 범위 내에서 최대허용속도까지 전동차를 가속시킨 후, 가속도를 천천히 줄인 후 주행에너지 소모를 줄일 수 있는 타행제어가 짧은 시간 나타났다가 정위치정차를 위한 제동제어로 전환됨을 알 수 있다.

Fig. 2는 MCS(Manual Control Supervision) 운행 모드에서 ATO 시스템이 제어하고 있는 역행, 제동 및 타행 패턴을 나타내는 그래프이다. 운전자는 속도제한 범위 내에서 최대허용속도까지 전동차를 가속시킨 후 속도제한조건, 선로의 구배 또는 곡선조건에 맞춰 주행에너지 소모를 줄일 수 있는 타행제어로 전환하여 최대한 타행운전 하다가 제동 시작점부터 B1 (braking 1단)~B4(braking 4단)로 단계적인 제동제어를 취급하고 다시 갑작스런 흔들림을 최소화하며

정위치정차하기 위해 B4~B1로 제동제어를 취급하고 있다.

상기 Fig. 1과 Fig. 2를 비교해 볼 때 ATO 시스템에 적용한 PID 제어방식은 계획된 시간 내에서 정시운행하기 위하여 역행 및 제동명령을 계속 반복하게 되므로 타행제어 시간이 짧아 MCS 운행에 비해 에너지 효율성 및 승차감 효과가 떨어짐을 알 수 있다.

2.2. 구간별 주행시간의 부적절

종합관제실 컴퓨터인 TTC(Total Traffic Computer)에는 각 역간별 전동차 주행시간이 고정 파라메타 값으로 입력되며, 최대허용속도로 주행할 때 산출된 시간과 입력시간을 비교, ATO 시스템은 각 구간별로 적절한 속도패턴을 산출하여 전동차를 실제 제어하게 된다¹⁾.

짧은 역간 거리를 정해진 운전 시분 내에 운행과 정차를 반복하며 운행하는 도시철도 시스템의 특성상 정차시간을 최소화하면 그 시간만큼 운행시간을 길게 설정할 수 있으므로 에너지 효율성 및 승차감 부분에서 보다 효과적인 운행패턴을 산출할 수 있게 된다.

하지만 상기 Fig. 3과 Fig. 4를 보면 각 역간별로 전동차가 최대가속도로 주행하는 속도프로파일을 추종하며 운행하므로 표준운행시간보다 평균 1~13 sec 빨리 다음 역에 도착한 후 그 시간만큼 더 정차했다가 출발하고 있다. 따라서 여유운전시분 2~4 sec를 고려하더라도 일부 구간에서

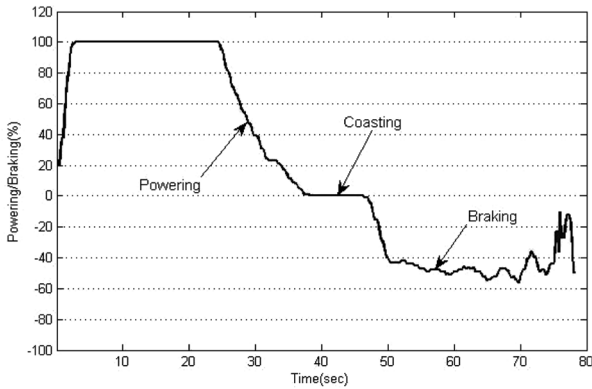


Fig. 1. Control profile of acceleration and deceleration at ATO mode.

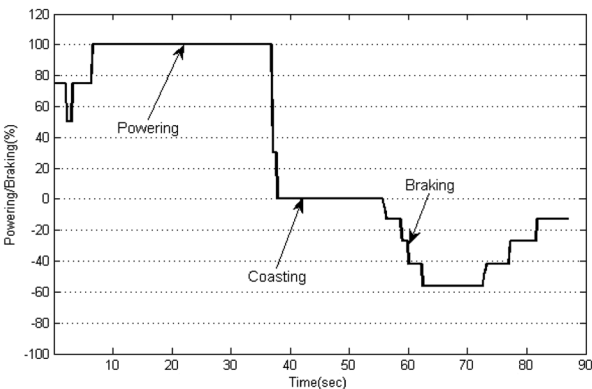


Fig. 2. Control profile of acceleration and deceleration at MCS mode.

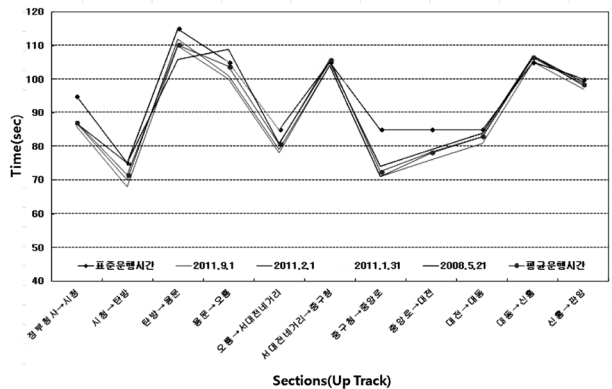


Fig. 3. Comparison of running times at ATO mode(up track).

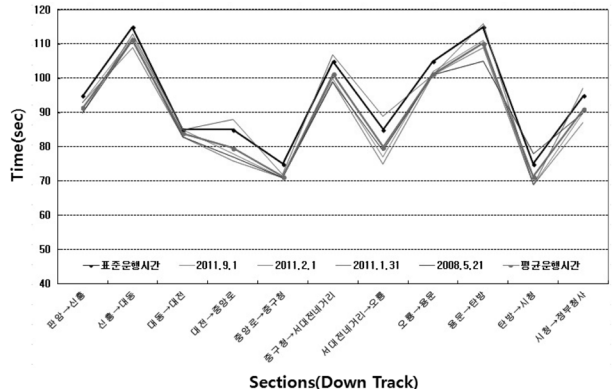


Fig. 4. Comparison of running times at ATO mode (Down Track).

는 ATO 운행패턴이 비효율적으로 적용되어 운영되고 있음을 알 수 있다. 모든 역의 이용승객들에게 사전 공지한 운행시간에 맞춰 전동차는 정시출발 해야 되므로 조금 빨리 도착했다고 조기 출발할 수는 없다. 따라서 빠른 운행에 따른 정차시간의 불필요한 증가는 전동차 운영 측면에서 아무런 이익을 줄 수 없으며 오히려 운행속도 증가로 주행에너지의 소모량만 많아지게 된다²⁾.

2.3. 스킨소음의 증가

철도차량이 회전반경이 작은 곡선구간을 운행할 때 발생하는 소음을 스킨소음(squeal noise)이라 하며, 사람의 귀에 가장 민감한 주파수를 내므로 매우 거슬리게 된다.³⁾ 스킨소음은 차륜뎀핑, 운행속도, 곡선반경, 레일의 구조, 습도, 온도 및 먼지 등 여러 가지 변수에 의해서 발생한다. 특히 운행속도가 커질수록 스킨소음의 수준도 커지게 된다⁴⁾. 소음의 측정단위는 시간적으로 평균한 등가소음도 dB(A) Leq로 표기하며, 도시철도 차량의 경우 최고운행속도를 낼 수 있는 직선 평탄선로에서 운전실 및 차내 소음은 70 dB(A) Leq이하이어야 한다⁵⁾.

Fig. 5는 신홍-대동역 하선 급곡선구간(R=250)의 ATO 운행속도를 낮추고 측정한 스킨소음을 운행속도 변경 전후로 비교한 그래프이다. 표준운행시간 범위 내에서 ATO 운행속도를 10~15 km/h 정도 낮추면 운행시간은 약 15 sec 증가하나 스킨소음이 약 5~6 dB(A) Leq 감소되므로 승차감이 크게 향상되는 효과가 나타난다.

따라서 곡선구간 통과속도가 너무 빠를 경우 전동차 운영 측면에서 주행에너지의 소모량이 많아짐은 물론 스킨소음이 크게 발생하여 승차감을 떨어뜨리는 문제점을 동반하게 된다.

2.4. 슬립/슬라이드 발생

내리막, 오르막에서는 레일과 전동차 휠의 마찰력 증가에 따라 슬립/슬라이드 현상이 발생할 수 있다. 즉 전동차가 ATO 운행 시 추진명령이 너무 크면 휠이 헛도는 슬립 현상이 발생된다. 이 경우 인버터장치는 구동차 4개축의

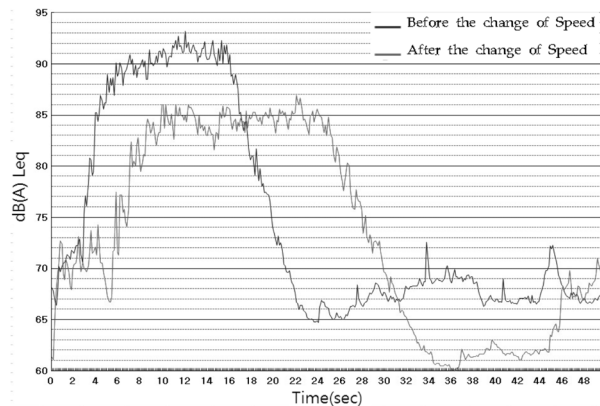


Fig. 5. Comparison of squeal noise according to velocity change at ATO mode.

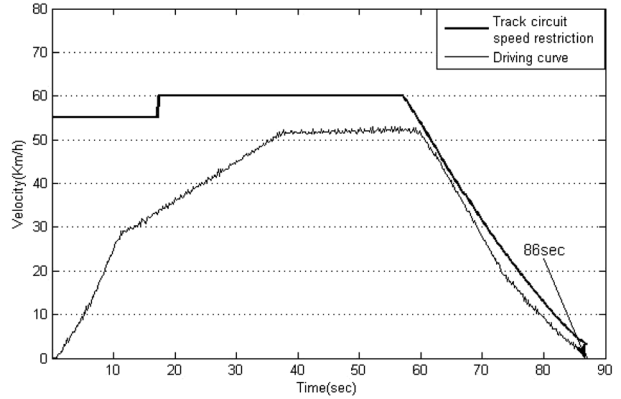


Fig. 6. Profile of passing slip at ATO mode.

회전속도를 비교해서 가장 늦게 도는 축 속도를 기준으로 모터를 제어하여 가용 점착계수의 사용이 효율적으로 될 수 있도록 함으로써 슬립현상을 최소화시킨다. 하지만 슬립현상에 따른 인버터장치의 출력감소 제어가 실행되면 정상적인 경우보다 인버터 출력이 30% 이상 감소되어 일정시간 제어하므로 운행시간은 늦어지게 된다. Fig. 6은 대전-중앙로역 구간을 운행할 때 나타난 슬립현상을 보여주고 있다.

또한 제동구간에서는 반대로 휠이 미끄러지는 슬라이드 현상이 나타날 수 있다. 차륜과 레일 간의 마찰력 부족으로 차륜이 미끄러지는 슬라이드현상이 발생하면 인버터장치는 재점착제어를 실행하게 되므로 이 경우에도 운행시간은 표준운행시간보다 늦어지게 된다. 계절별 특성에 따른 선로 상태, 차륜상태, 도유량 등 전동차의 슬립, 슬라이드 현상에 영향을 줄 수 있는 외란 조건은 다양하나, 전동차 ATO 프로그램이 정밀하게 튜닝되어 있다면 인버터장치의 출력감소 및 재점착 제어에 따른 운행시간의 지연을 최소화할 수 있다. ATO 프로그램을 튜닝할 때 선로 및 하중조건에 맞게 인버터장치를 능동적으로 제어해야 되나, 너무 빠른 패턴의 가·감속 제어는 슬립/슬라이드 현상이 발생되어 이로 인해 순간적인 승차감 저하와 함께 출력감소 및 재점착 제어에 따른 전동차 운행시간의 지연이 동반되게 된다.

3. ECO 운행패턴의 도출

3.1. ECO 운행패턴의 필요성

도시철도 시스템은 타 교통 시스템에 비해 상대적으로 높은 에너지 효율성에도 불구하고 많은 전기 에너지를 소비하므로 주어진 운행시간 내에서 에너지 소비를 최소화할 수 있는 방안은 매우 유용할 것으로 판단된다. 에너지 소비는 운행시간에 반비례하므로 운행시간과 에너지 소비간의 적정선을 찾아야 한다⁶⁾.

전동차의 운행시간은 슬립/슬라이드가 없고 역행 및 제동성능이 정상인 조건에서 도시철도 사업의 경제성 검토 시 결정되지만 실제 열차 운행 시에는 여유운행시분(최소 운행시간의 2~4%)을 더한 표준운행시간을 산출하여 실제 운영하는데 이는 전동차가 지연되는 경우 이를 만회하여

전동차 운행스케줄을 회복할 수 있도록 하기 위함이다. 이러한 여유운행시분은 운전자가 부담을 갖지 않고 운전할 수 있도록 하며 동시에 경제 운전을 통해 에너지 소비를 줄일 수 있는 여유를 제공한다.

3.2. 에너지 최적화 궤적의 고찰

도시철도 시스템의 주요 목표는 차량의 특성, 선로 및 하중조건, 운행시간 및 승차감 등 많은 조건들을 만족하며 역과 역 사이의 계획된 시간에 알맞게 주행 및 정차를 반복하며 주행에너지를 절감하며 운행되어야 한다.

전동차의 주행에너지를 절감하기 위한 궤적의 계산에는 타행과 정속주행이 포함되어야 한다. 타행이란 역행이나 제동이 없는 진행이며 정속주행은 허가된 제한속도보다 낮은 속도를 일정하게 유지하며 진행하는 것을 의미한다. 속도제한구간이나 정지점까지의 타행제어 시간은 최대 가속력에 따라 결정되며, 다음 역까지의 운행시간이 스케줄 시간보다 여유가 있을 경우의 최대속도는 감속되어 전동차는 정속주행하게 된다.

따라서 정속주행 및 타행을 조합한 전동차 운행은 에너지를 최대 효율로 활용하여 전력소모를 줄이는 최상의 방법으로 전력소모를 줄일 뿐만 아니라 자동제어의 최적화를 지향할 수 있다. 각 구간별 선로조건을 고려하여 제한속도 내에서 역행제어하고 적절한 지점부터 타행제어로 전환하여 에너지 사용량을 최소화한 주행패턴과 승차감과 정위치정차를 고려한 제동제어의 시점을 결정하여 ATO 시스템이 추종할 수 있는 에너지 최적화 궤적을 각 구간별로 도출하는 것이 무엇보다도 중요하다.

3.3. 안전 개념의 확보

ATO 운행시스템은 열차의 안전운행과 효율적인 노선 운영을 위하여 고도의 안전성과 신뢰성을 보장해야 한다. 실제 운행에서 속도제한조건은 선로 파라메타와 열차의 물리적 특성에 따라 변경되지 않기 때문에 삭제 불가능한 데이터로 시스템에 저장되어 있기에 금번 연구에서도 속도제한조건을 실제와 같이 일정하게 적용하여 시뮬레이션하였다. ATP(Automatic Train Protection)는 규정된 최고 허용속도보다 과속하게 되면 안전 확보를 위하여 비상제동을 체결하게 된다. 이와 같은 전동차의 안전성능을 고려하여 비상제동이 체결되는 조건인 제한속도보다 4 km/h 초과되는 속도로 운행되는 경우가 발생하는 ECO 운행패턴은 실패로 처리하고 다시 시뮬레이션 함으로써 ECO 운행패턴의 안전성을 최대도로 확보하였다. 또한 전동차의 역행 및 제동특성과 하중조건, 선로의 구배 및 곡선반경 조건 등의 파라메타 값들은 전동차의 안전운행과 정확도 및 승차감을 위하여 신뢰성 있는 데이터의 적용이 필요하므로 전동차 제작사에서 제공한 데이터를 사용함으로써 전동차가 실제로 동작하는 것과 시뮬레이션 결과의 오차를 최소화하였다. 전동차의 모델링에서 안전과 가장 밀접한 부분은 전동차의 제동 특성이다. 직선 및 평탄선로, 슬라이딩 현상의 최소화, 마르고 깨끗한 선로상태에서 최소한 보장되는 상용제동률(3.0 km/h/s, 0.972 %) 및 차량 중량과 저크 제

어값도 금번 시뮬레이션에서는 일정하게 적용하였으며, 전동차의 견인력에 큰 영향을 주는 열차주행저항을 실제와 같게 산출하기 위하여 마찰저항계수, 차륜동요저항계수, 공기저항계수가 적용된 열차주행저항(R_r) 실험식⁷⁾을 모든 구간에서 유효하게 적용하였으므로 도출되는 모든 ECO 운행패턴은 안전 개념을 충분히 고려한 결과이므로 실제 전동차 운영에 적용하여도 안전에 문제가 없다.

$$R_r = (1.867 + 0.0359 V) \times W + 0.000745 V^2 \text{ [kgf]} \quad (1)$$

여기서 R_r : 총 주행저항[kgf]
 W : 차량중량[ton]
 V : 열차속도[km/h]

4. 시뮬레이션 수행

4.1. 시뮬레이션 시 고려할 사항

금번 연구에서는 다음 역까지의 거리에 대한 위치함수로 요구되는 최적의 속도궤적을 산출하기 위하여 다음과 같은 조건들을 충분히 고려하여 시뮬레이션 함으로써 전동차가 구간별 운행시간을 지키면서 전력소모를 줄일 수 있는 ECO 운행패턴을 도출하고자 하였다.

- (1) 운행시간의 설정
- (2) 구간별로 설정된 제한속도(Track Circuit Speed Restriction)의 확인
- (3) 트랙 데이터(곡선구간, 구배조건, 다음 역까지의 전체거리)의 확인
 - 궤도구배가 가·감속에 미치는 영향
 - 반경에 의존하는 곡선부의 제동효과
- (4) 단계적인 역행제어로 목표지점(속도)까지 가속
 - 슬립현상 발생에 따른 VVVF 인버터의 출력저해 제어 시, 속도저하로 인한 운행시간의 증가 방지
- (5) 곡선, 구배조건을 고려하여 목표지점(속도)부터 타행제어로 전환
 - 하구배의 경우 제한속도를 넘게 되어 제동제어를 취급하지 않도록 제어
 - 곡선구간의 경우 자연적인 감속효과를 고려하며, 속도가 너무 떨어지는 경우 및 곡선구간이 끝나는 부분부터 역행제어
- (6) 제동시점부터 단계적인 제동제어로 정차
 - 저크 발생의 최소화
 - 슬라이드현상 발생에 따른 VVVF 인버터의 재점착 제어 시, 속도저하로 인한 운행시간의 증가 방지
- (7) 전기/공기제동의 브렌딩 시점인 11 km/h 이하의 속도 영역에서의 회생에너지는 0에 가까운 값으로 처리
- (8) ECO 운행패턴 도출
 - 패턴속도가 제한속도를 4 km/h 초과하는 경우에는 권속속도를 0.5 km/h씩 낮추며 시뮬레이션을 재실행
- (9) 운행시간, 속도커브 및 에너지 사용량 출력
- (10) 설정된 운행시간과의 오차 발생 시에는 (4)번부터 재실행

4.2. 시뮬레이션 알고리즘

Fig. 7은 금번 연구에서 사용한 전동차 주행 시뮬레이션 프로그램의 알고리즘이다.

4.3. 시뮬레이션 사례

전동차가 구간별 운행시간을 지키면서 전력소모를 줄일 수 있는 ECO 운행패턴을 도출하기 위하여 선로구배, 곡

선 등의 조건들을 충분히 고려한 시뮬레이션을 수행한 후 실제 운행데이터와 비교하였다.

용문-탄방역 하선(1,194 m)구간의 곡선 및 상, 하구배 등 선로조건을 고려하여 표준운행시간 115 sec와 속도제한조건 60-50-35 km/h 내에서 12.28 ton의 승객을 태우고 ATO 모드로 실제 운행한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이 구간은 R=200의 급곡선 구간이 존재하며 속도제한이 3가지 계단

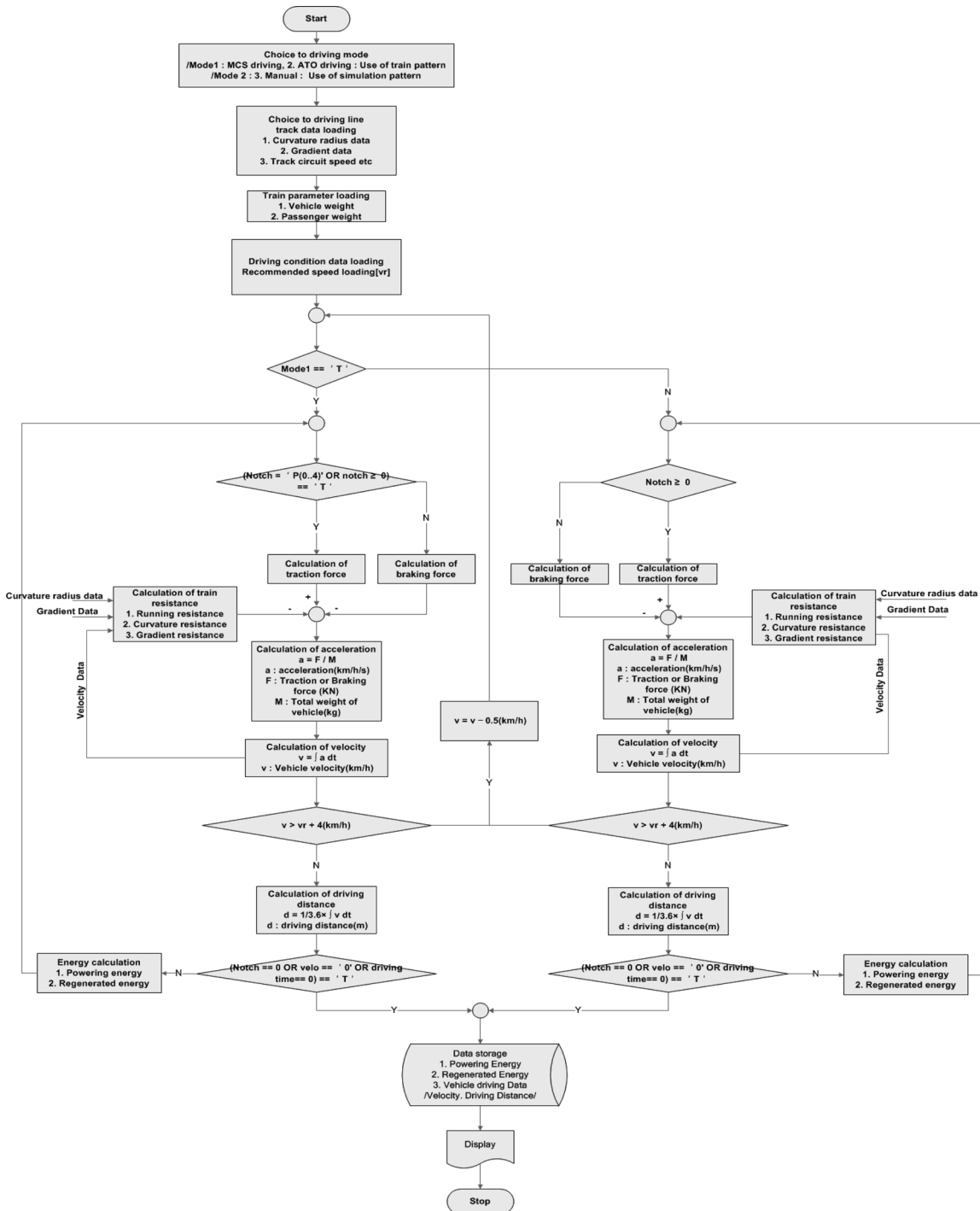


Fig. 7. Simulation algorithm.

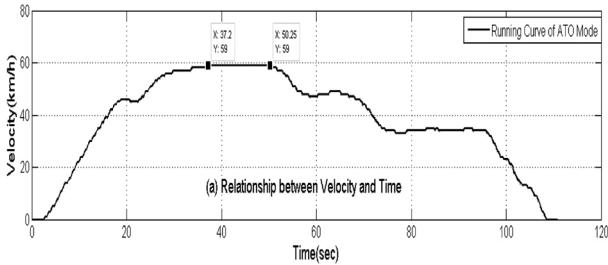


Fig. 8. Real running curve at ATO mode.

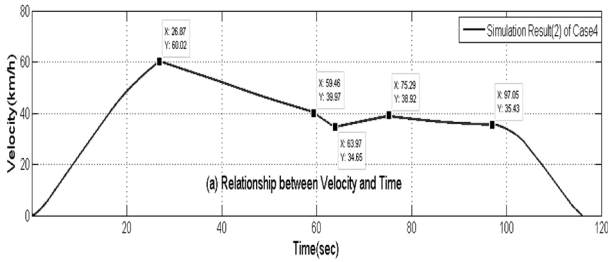


Fig. 9. Simulated velocity profile according to track conditions.

Table 1. Comparison of running patterns.

Classification	Results of Operation & Simulation	
	ATO Mode	Simulation Results
Running Time [sec]	115	115
Max. Speed [km/h]	59.0	60.0
Energy [kWh]	Powering Energy	10.47
	Regenerated Energy	0.46
	Consumed Energy	10.01
	Saving Effect	※ 10.01-8.49=1.52[kWh, △15.2%]

※ The energy is calculated in simulation.

형태로 설정된 복잡한 형태의 선로특성을 가지고 있다.

또 동일 조건에서 운행패턴을 단순화하고 타행제어를 고려한 시뮬레이션 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 시뮬레이션 수행 시 전동차의 운행패턴을 역행, 타행 및 제동제어로 간략화하고 급곡선 구간에서의 자연적인 제동효과로 견인력이 부족하여 정위치정차를 도달하지 못하는 문제점을 부분적인 역행과 제동제어를 추가함으로써 주행시간 및 정위치정차에 필요한 운행거리를 동시에 만족시킬 수 있었다.

Table 1은 상기 구간을 ATO 모드로 운행하였을 때와 운행패턴을 단순화하고 타행제어를 고려한 시뮬레이션 결과의 에너지 소비량을 비교하였다. 시뮬레이션 결과로 선로특성에 따라 역간 운행시간과 거리 및 속도제한 조건을 모두 만족시킬 수 있는 타행시작점과 종료시점을 찾아내어 에너지 소비를 최소화하고 운행패턴을 단순화시킬 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

금번 연구에서는 현재 운행되고 있는 전동차의 자동·수동운전 운행패턴의 차이점을 확인하였으며 전동차 운

행의 안전성을 확보하며 기존 ATO 운행패턴의 문제점을 개선하기 위한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 향후 연구에서는 각각 다른 구간에서 5가지 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하여 주행에너지 사용량을 최소화할 수 있는 ECO 운행패턴을 도출하고자 한다.

1) 현행 ATO 시스템에 적용한 PID 제어방식은 타행제어 시간이 짧아 MCS 운행에 비해 에너지 효율성 및 승차감 효과가 떨어짐을 알 수 있었다.

2) 정차시간의 불필요한 증가는 전동차 운영 측면에서 아무런 이익을 줄 수 없으며 오히려 운행속도 증가로 주행에너지의 소모량만 많아진다.

3) 전동차의 곡선구간 통과속도가 너무 빠를 경우 주행에너지의 소모량이 많아짐은 물론 스킵소음이 크게 발생하여 승차감을 떨어뜨리게 된다.

4) 너무 빠른 패턴의 전동차 가·감속 제어는 슬립/슬라이드 현상이 발생되어 순간적인 승차감 저하와 함께 출력 감소 및 재점착 제어로 전동차 운행시간이 지연된다.

5) 구간별 선로조건을 고려하여 제한속도 내에서 역행 제어하고 적절한 지점부터 타행제어로 전환하여 에너지 사용량을 최소화한 주행패턴과 승차감 및 정위치정차를 고려한 제동제어의 시점의 결정은 ECO 운행패턴을 도출하는데 가장 중요함을 확인하였다.

Reference

- Keun-Hyung Hyen, "The Manual of Signal System of Daejeon Subway Line No. #1", SamSung SDS Ltd., pp. 3-18, 2004.
- Yong-Hyun Kim, Dong-Hwan Kim and Chi-Tae Kim, "A Study on the Selection of Train Operation Mode Minimizing the Running Energy Consumption", Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 15, No. 1, pp. 38-48, 2007.
- C. J. M. Van Ruiten, "Mechanism of Squeal Noise Generated by Trams", J. Sound. Vid, 120(2), pp. 245-253, 1988.
- Kyeong-Ho Moon, Won-Hee You and Jae-Chul Kim, "A Study on the Squeal Noise for Subway", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 6, No. 3, pp. 209-214, 2003.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. "The Standard of Performance Test of Urban Transit Vehicle Systems" (Notice No. 413, 2011)
- Tae-Hyung Lee and Hee-Soo Hang, "Development of Economical Run Model for Electric Railway Vehicle" Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 9, No. 1, pp. 76-80, 2006.
- Kyu-Joong Kim, Keun-Oh Lee and Su-Kwan An, "An Analysis about Consumed Energy of Electric Multiple Unit Used TCMS Data on the Condition of Safety Driving", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 27, No. 6, pp. 31-42, 2012.