

ATO 시스템 전동차의 ECO 운행패턴 적용에 관한 연구 (시뮬레이션 결과를 중심으로)

김규중 · 이근오^{**} · 김주용^{**}

대전광역시도시철도공사 · *서울과학기술대학교 안전공학과 · **우송대학교 철도차량시스템과
(2012. 10. 29. 접수 / 2013. 2. 8. 채택)

A Study on Application of ECO Driving Pattern of Electric Multiple Unit in ATO System (Focus on Simulation Results)

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 29 October 2012 / Accepted 8 February 2013)

Abstract : This study focuses on finding ECO driving patterns which consider driving safety of the ATO system train and reliability and which optimize efficiency of the driving energy consumption. Research results derived by performing simulation of those 5 models show that the emergency braking which affects safety of passenger and the machinery is minimized, and safe driving speed is maintained by the prohibition of drastic acceleration/deceleration, coasting and constant-speed driving. Therefore if this result is applied to the urban railway train by amending or making ATO program to save energy usage that improve environmental quality, its effects as ECO driving pattern is huge.

Key Words : electric multiple unit(EMU), ECO driving pattern, automatic train operation system(ATO system), reliability, emergency braking

1. 서론

금번 연구는 대도시철도 1호선 전동차 4량을 대상으로 각각 다른 구간에서 다양한 조건으로 전동차 주행에너지 소비에 대한 시뮬레이션을 수행하여 ATO 시스템(Automatic Train Operation System) 전동차의 운행 안전성과 신뢰성을 확보하고 주행에너지의 사용효율을 최적화할 수 있는 ECO 운행패턴을 찾는데 그 목적을 두었다.

연구방법으로는 현재 운행되고 있는 전동차의 자동·수동운전 운행패턴의 차이점과 에너지 사용량을 비교·분석한 후, 기존 ATO 운행패턴의 문제점을 개선하기 위하여 여러 가지 모델에 대하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션을 수행하여 도출한 연구결과는 승객과 기계장치의 안전에 영향을 주는 비상제동 체계를 최소화하며 급격한 가·감속의 금지, 타행 및 정속주행으로 안전한 운행속도를 유지하여 주행 에너지 사용량을 약 15% 절감하고 환경의 질을 개선시킬 수 있는 ECO 운행패턴으로서 ATO 프로그램에 적용 시 그 효과는 클 것으로 판단된다.

2. ECO 운행패턴의 제작절차

국내 대부분의 전동차 자동열차운전제어(ATO) 시스템은 선진 외국의 다양한 기술력을 토대로 설계되었기에 각 운영기관의 신설 노선 개통 전 본선시운전 과정에서 국내 기술자들이 외국 기술자들과 함께 ATO 운행패턴 및 정위치정차 등의 튜닝을 수행해 왔지만 기술적인 종속관계에서 튜닝업무가 진행되어 왔다.

전동차의 역행/제동성능과 주요 장치의 반응특성 및 숙련된 운전자들의 효율적인 수동운전기법을 완전히 접목한 ATO 프로그램을 튜닝하여 실제 운영노선에 적용한다면 최적의 ATO 프로그램이 완성되겠지만 시운전기간 동안 여러 가지 목적을 모두 충족시킬 수 있는 ATO 프로그램을 완성하기란 결코 쉬운 일이 아니다.

도시철도는 여러 분야의 기술력이 접목되는 분야이므로 ATO 프로그램도 각 분야의 경험 많은 기술자들이 모여 제작하는 게 가장 이상적인 업무절차이나, ATO 프로그래머가 전동차의 역행 및 제동 특성을 완전히 이해하고 또한 숙련된 운전자들의 수동운전 기법을 경험하여 ATO 프로그램을 제작하기란 사실상 불가능하다. 따라서 승객부하 및 회생전력량 변화에 안정적인 가·감속 패턴과 정위치정차 등을 만족시키기 위한 ATO 프로그램을 튜닝하다 보면 승차

*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 Gongrung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

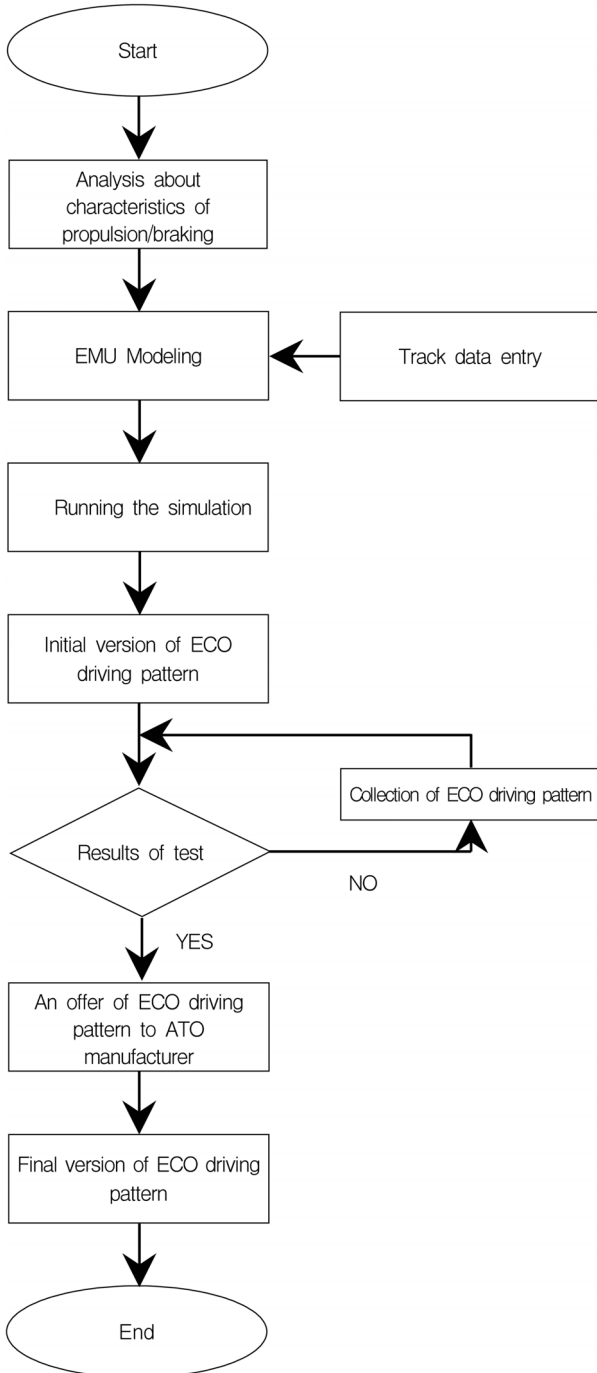


Fig. 1. Work process of ATO tuning.

감항상이나 전력사용량의 최소화는 튜닝의 우선순위에서 밀리게 되며 기술적으로 완성되지 않은 ATO 프로그램을 개통 노선에 적용하여 운영하다 보면 여러 가지 불만족스러운 현상들이 나타나게 된다.

궤도부설공사와 전차선 및 지상신호 시스템은 개통 전 가장 먼저 시공되므로 전동차 시운전기간을 활용하여 공차 및 만차 조건에서의 전동차 역행 및 제동 특성을 파악하여 모델링한 후, 각 구간별 궤도데이터를 입력하여 시뮬레이션 결과로 만든 운행패턴을 기관사들이 직접 수동운전

하여 검증하고 보완한다면 안전한 운행속도의 유지로 주행에너지 사용의 최소화가 가능한 최적의 열차 운행패턴과 주행시간을 빠른 시간 내에 도출할 수 있으며, 그 결과물을 ATO 시스템 제작사에게 제공하여 ATO 프로그램 제작에 반영시킨다면 개통 이후 실제로 사용할 수 있는 최적의 ECO 운행패턴을 완성할 수 있다.

Fig. 1은 도시철도 신설 노선의 개통 전, 최적의 전동차 ECO 운행패턴을 제작하기 위한 효율적인 업무 진행과정의 알고리즘을 나타내고 있다. 기존 노선의 ATO 프로그램 수정 또는 신설노선의 ATO 프로그램 제작 시 활용한다면 그 효과는 매우 클 것으로 사료된다.

3. 시뮬레이션 수행

3.1. 시뮬레이션 모델의 설정

금번 연구에서는 각각 다른 구간에서 다양한 조건으로 수행한 전동차 주행에너지 소비에 대한 시뮬레이션 결과의 객관성을 확보하기 위하여 각 모델의 승객하중조건 및 회생에너지의 사용률을 33.3%로 동일하게 적용¹⁾하였으며 시뮬레이션 모델은 다음과 같다.

- (1) 모델 1 : 타행제어의 필요성
- (2) 모델 2 : 운행시간의 영향
- (3) 모델 3 : 출발패턴의 비교
- (4) 모델 4 : 운행패턴의 변화
- (5) 모델 5 : 슬립현상의 최소화

슬립(Slip)현상은 일시적이며 비정상적인 외란조건으로서

Table 1. Track conditions of simulation models.

Classification		Simulation Sections		
Model (1), (2)	Section	Jungang-ro → Joengguchung Stations		
	Speed limit [km/h]	55		
	Curvature Radius [m]	R=250 (Part of Section)		
	Gradient [%]	0~498 [m]	498~722 [m]	
		+20	-2	
Model (3), (4-1)	Section	Joengguchung → Jungang-ro Stations		
	Speed limit [km/h]	55		
	Curvature Radius [m]	R=250 (Part of Section)		
	Gradient [%]	0~224 [m]	224~722 [m]	
		-2	+20	
Model (4-2)	Section	Yongmoon → Tanbang Stations		
	Speed limit [km/h]	60-50-35		
	Curvature Radius [m]	R=200 (Part of Section)		
	Gradient [%]	0~858 [m]	858~1,194 [m]	
		+13	-3	
Model (5)	Section	Tanbang → City Hall Stations		
	Speed limit [km/h]	50-65		
	Curvature Radius [m]	R=300 (Part of Section)		
	Gradient [%]	0~148 [m]	148~528 [m]	528~748 [m]
		-3	-8	-6

VVVF 인버터(Variable Voltage Variable Frequency Inverter)가 별도로 속도 제어하므로²⁾시뮬레이션 결과의 정확성을 확보하기 위하여 ATO 및 MCS(Manual Control Supervision) 운행모드로 실제 운행 시 슬립이 잘 발생되지 않는 구간을 선택하였다. Table 1은 시뮬레이션에 적용한 각 구간의 트랙 데이터와 운행조건들을 나타내고 있다.

3.2. 시뮬레이션 결과

3.2.1. 타행제어의 필요성 (모델 1)

중앙로-중구청역 하선구간의 선로조건은 상구배와 하구배가 존재하며 일부 구간이 R=250의 급한 곡선부위인 길이 722 m의 구간으로 표준운행시간과 속도제한조건은 각각 75 sec 및 55 km/h로 설정되어 있다. Fig. 2는 전동차가 13.66 ton의 승객을 태우고 중앙로-중구청역 하선구간을 ATO 모드로 실제 운행한 결과를 나타낸 그래프이다. 역 출발 후 30~100%의 견인력으로 제한속도인 55 km/h까지 계속 추진하다가 하구배 시작지점부터 서서히 제동력을 발생시켜 정지하였으며 운행시간은 72 sec였다.

TDIC(Train Diagnostic Information Computer)에 기록된 ATO 운행데이터를 분석해 보면 속도제한 범위 내에서 주행에너지 소비를 최소화할 수 있는 타행(Coasting)제어를 사용하지 않고 최대허용속도까지 가속시키다가 가속도를 천천히 줄이며 정위치정차를 위한 제동제어로 전환됨을 알 수 있다.

Fig. 3은 동일 하중조건으로 중앙로-중구청역 하선구간의 선로조건을 고려한 MCS 운행패턴의 시뮬레이션 수행 결과이다.

ATO 모드와 시뮬레이션의 운행시간은 72 sec로 같았

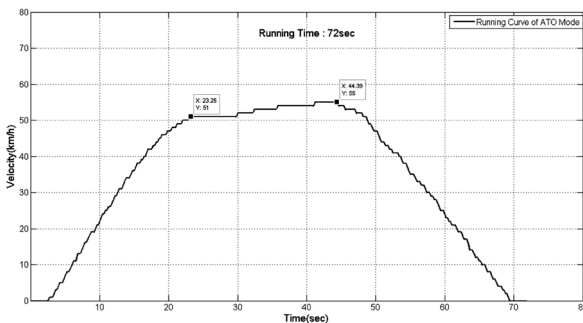


Fig. 2. Real running curve at ATO mode, (Jungang-ro → Joongguchung)

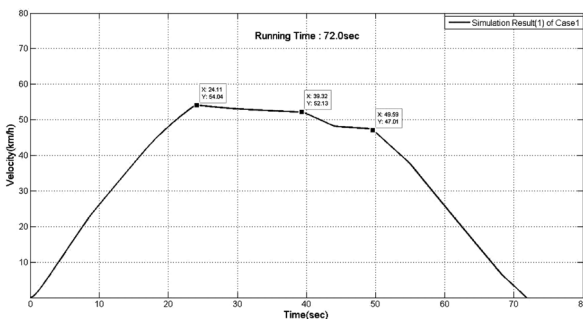


Fig. 3. Simulated velocity profile considering coasting effect, (Jungang-ro → Joongguchung)

Table 2. Comparison of running patterns.

Classification	Results of Operation & Simulation	
	ATO Mode	Simulation Results
Running Time	72 sec	72 sec
Max. Speed	55.0 km/h	54.0 km/h
Coasting Control	Start Point	44.6 sec
	End Point	45.0 sec
Energy [kWh]	Powering Energy	9.63
	Regenerated Energy	0.73
	Consumed Energy	8.90
	Saving Effect	※ 8.90 - 7.99 = 0.91 [kWh, △10.2%]

※ The energy is calculated in simulation.

나 +20%의 상구배 구간을 54 km/h까지 가속하고 탄력을 이용한 30%의 역행제어를 15 sec 수행하고 -2%의 하구배 구간 직전부터 타행제어를 10 sec 동안 수행한 후, 제동제어로 전환함으로써 에너지 사용량을 10.2% 절감하였다.

Table 2는 상기 구간을 ATO 모드로 운행하였을 때와 타행제어를 고려한 MCS 모드의 시뮬레이션 수행결과를 비교하였다. ATO 모드에서 곡선 및 상, 하구배 등의 선로조건을 고려한 효율적인 가·감속 및 타행제어가 수행되지 않으면 에너지 효율성이 떨어지게 됨을 확인하였다.

3.2.2. 운행시간의 영향 (모델 2)

모델 (2)는 중앙로-중구청역 하선구간을 표준운전시간 75 sec 내에서 +2%~+4%의 여유운전시분을 각각 활용하여 동일한 승객하중조건(13.66 ton)으로 MCS 운행한 패턴을 시뮬레이션 하여 Fig. 4~Fig. 6의 그래프로 그 결과를 비교하였다. 운행시간이 증가함에 따라 선로특성에 따른 최고속도와 탄력을 이용한 P1(powering 1단) 역행제어 및 타행제어 패턴 등 운행곡선의 차이가 나타남을 알 수 있다.

+20%의 상구배 구간을 일정속도까지 가속하고 그 탄력을 이용한 30%의 P1 역행제어를 일정시간 수행한 후, -2%의 하구배 구간 직전부터 타행제어의 수행 및 제동제어로 전환하는 경제적인 운행으로 MCS 모드로 운행할 경우 보다 에너지 사용량을 0.8~3% 절감할 수 있었다.

도시철도의 경우 열차운행다이나미를 계획할 때 통상 +2%~+4%의 여유운전시분을 고려하여 각 구간의 표준운전시분을 결정³⁾하므로, 여유운전시분을 최대로 활용한 전동차 운행

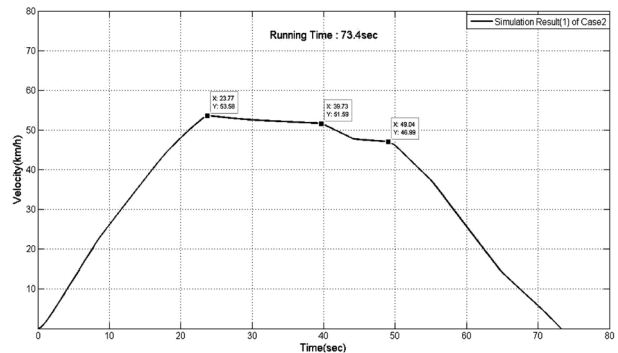


Fig. 4. Simulated velocity profile according to increased running time (73.4 sec, +2%), (Jungang-ro → Joongguchung)

ATO 시스템 전동차의 ECO 운행패턴 적용에 관한 연구
(시뮬레이션 결과를 중심으로)

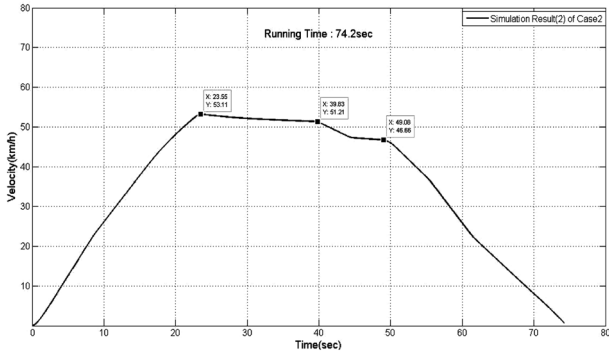


Fig. 5. Simulated velocity profile according to increased running time (74.2sec, +3%).
(Jungang-ro → Joengguchung)

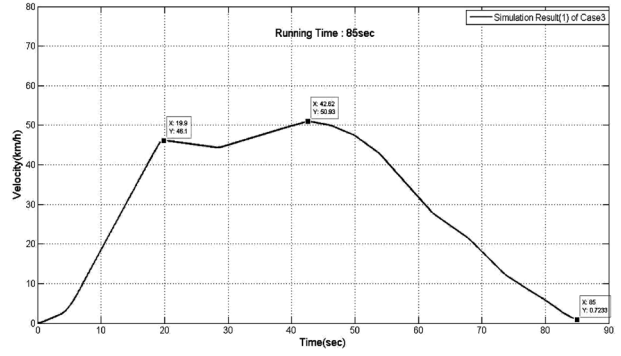


Fig. 7. Simulated velocity profile(1) according to change of departure pattern.
(Joongguchung → Jungang-ro)

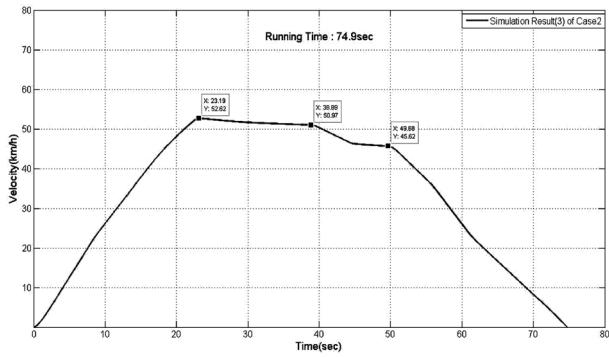


Fig. 6. Simulated velocity profile according to increased running time (74.9sec, +4%).
(Jungang-ro → Joengguchung)

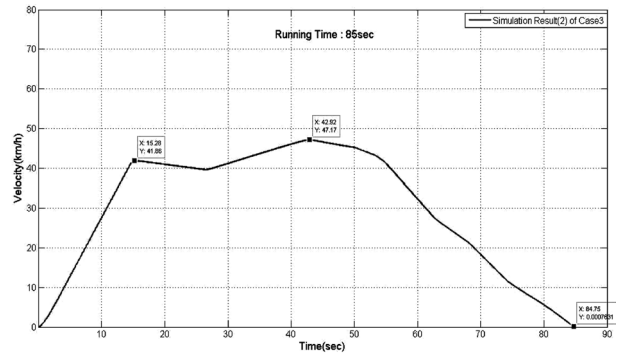


Fig. 8. Simulated velocity profile(2) according to change of departure pattern.
(Joongguchung → Jungang-ro)

Table 3. Comparison of simulation results.

Classification	Simulation Results according to Increased Running Time			
	+2%	+3%	+4%	
Running Time	73.4 sec	74.2 sec	74.9 sec	
Max. Speed	53.6 km/h	53.1 km/h	52.6 km/h	
Coasting Control	Start Point	39.7 sec	39.8 sec	38.9 sec
	End Point	49.0 sec	49.1 sec	49.7 sec
Energy [kWh]	Powering Energy	8.51	8.47	8.27
	Regenerated Energy	0.58	0.57	0.54
	Consumed Energy	7.93	7.90	7.73
	Saving Effect	0.06 [$\Delta 0.75\%$]	0.09 [$\Delta 1.12\%$]	0.26 [$\Delta 3.25\%$]

※ The energy is calculated in simulation.

패턴은 에너지 절감에 효과가 있음을 시뮬레이션 결과로서 알 수 있었다.

여유운전시간을 활용한 MCS 운행 모드의 시뮬레이션 결과를 Table 3에 비교하였다.

3.2.3. 출발패턴의 비교 (모델 3)

동일한 승객하중조건(13.24 ton)으로 중구청-중앙로역 상 선구간을 표준운행시간 85 sec와 속도제한조건 55 km/h 내에서의 MCS 운행출발패턴에 변화를 주고 시뮬레이션 하여 Fig. 7~Fig. 8의 그래프로 그 결과를 비교하였다.

시뮬레이션 수행결과 전동차의 운행시간은 85 sec로 같

았으나 -2%의 하구배 구간을 어떤 패턴으로 최고속도까지 가속하며 출발하느냐에 따라 타행시작점까지의 속도와 도달시간, 제동제어는 물론 에너지 사용량에서도 21.3%의 차이가 발생하였다. 충분한 가속력으로 슬립 현상이 발생되지 않는 제어패턴으로 출발하는 것이 타행제어로 더 긴 시간 운행할 수 있으므로 에너지 절감에 효율적임을 시뮬레이션 결과로 확인하였다.

Table 4는 출발패턴 변화에 따른 MCS 운행 모드의 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

Table 4. Simulation results according to change of departure pattern.

Classification	Simulation Results according to Change of Departure Pattern		
	Sloppy Acceleration	Steep Acceleration	
Running Time	85 sec	85 sec	
Max. Speed	50.9 km/h	47.2 km/h	
Coasting Control	Start Point	19.9 sec	15.3 sec
	End Point	42.6 sec	42.9 sec
Energy [kWh]	Powering Energy	3.62	2.96
	Regenerated Energy	0.94	0.85
	Consumed Energy	2.68	2.11
	Saving Effect	※ 2.68-2.11=0.57 [kWh, $\Delta 21.3\%$]	

※ The energy is calculated in simulation.

3.2.4. 운행패턴의 변화 (모델 4)

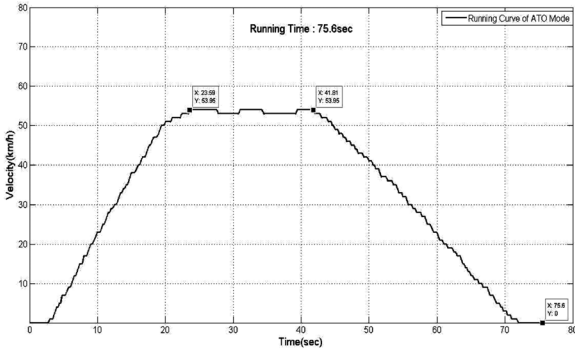


Fig. 9. Real running curve at ATO mode. (Joongguchung → Jungang-ro)

모델 (4-1)은 전동차가 13.24 ton의 승객을 태우고 중구청-중앙로역 상선구간을 표준운행시간 85 sec와 속도제한 조건 55 km/h 내에서 ATO 모드로 실제 운행한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

TDIC에 기록된 전동차 ATO 운행데이터를 분석해 보면 역 출발 후 30~100%에 해당하는 견인력으로 속도제한 범위 내에서 최대허용속도인 54 km/h까지 계속 추진한 후에 순간적인 타행과 제동을 반복하며 제한속도 55 km/h를 유지하다 서서히 제동력을 발생시켜 갑작스런 흔들림을 방지하며 정위치정차를 위한 제동제어로 전환하여 정지하였으며 운

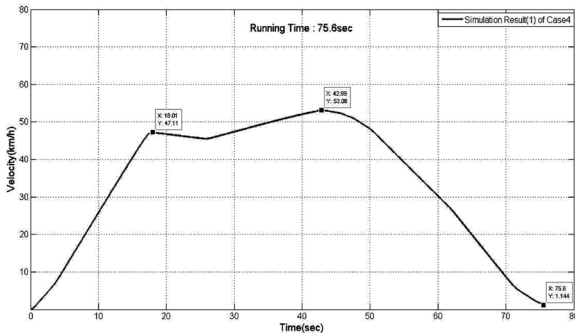


Fig. 10. Simulated velocity profile according to track conditions. (Joongguchung → Jungang-ro)

Table 5. Comparison of running patterns.

Classification		Results of Operation & Simulation	
		ATO Mode	Simulation Results
Running Time		75.6 sec	75.6 sec
Max. Speed		54.0 km/h	53.1 km/h
Coasting Control	(1)	Start Point	21.8 sec
		End Point	24.0 sec
	(2)	Start Point	29.4 sec
		End Point	30.2 sec
	(3)	Start Point	36.4 sec
		End Point	38.8 sec
Energy [kWh]	Powering Energy	4.99	3.78
	Regenerated Energy	1.27	0.95
	Consumed Energy	3.72	2.83
	Saving Effect	※ 3.72-2.83=0.89 [kWh, △23.9%]	

※ The energy is calculated in simulation.

행시간은 75.6 sec다.

Fig. 10은 동일한 승객하중조건으로 중구청-중앙로역 상선구간의 곡선 및 상, 하구배 등 선로조건을 고려하고 ATO 모드와 동일한 운행시간 75.6 sec로 시뮬레이션 하여 도출한 MCS 운행패턴을 나타낸 그래프이다.

Table 5는 상기 구간을 ATO 모드로 운행하였을 때와 타행제어를 고려한 MCS 모드의 시뮬레이션 수행결과를 비교하였다.

시뮬레이션 결과 운행시간은 75.6 sec로 ATO 모드와 같았으나 54 km/h까지 가속하지 않고도 47 km/h까지의 탄력에 의한 운동에너지와 -2‰ 하구배 구간을 활용한 타행제어를 25sec 수행하여 53 km/h까지 가속한 후 제동제어로 전환, 에너지 사용량을 24.1% 절감할 수 있었다.

ATO 모드에서 곡선 및 상, 하구배 등의 선로조건을 고려한 효율적인 가·감속 및 타행제어가 수행되지 않으면 에너지 효율성이 떨어지게 됨을 확인하였다.

모델 (4-2)는 전동차가 12.28 ton의 승객을 태우고 용문-탄방역 하선(1,194m)구간을 표준운행시간 115 sec와 속도제한조건 60-50-35 km/h 내에서 ATO 모드로 운행한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 이 구간은 R=200의 급곡선 구간이 존재하며 속도제한이 3가지 계단형태로 설정된 복잡한 형태의 선로특성을 가지고 있다.

TDIC에 기록된 전동차 ATO 운행데이터를 분석해 보면 역 출발 후 30~100%에 해당하는 견인력으로 1차 속도제한 (60 km/h) 범위 내에서 계속 추진한 후에 순간적인 역행과 타행을 반복하며 속도 59 km/h를 유지하다 -13~42%에 해당하는 제동력을 발생시켜 다음 속도제한 구간에 진입하여 다시 순간적인 역행, 타행 및 제동제어를 반복하며 2, 3차 속도제한 조건에 맞춰 운행하다가 3차 속도제한(35 km/h) 구간이 끝나는 지점부터 서서히 제동력을 발생시켜 갑작스런 흔들림을 방지하며 정위치정차를 위한 제동제어로 전환하여 정지하는 매우 복잡한 패턴의 차량제어를 수행하고 있음을 알 수 있었다. 이 구간도 ATO 모드에서 역행, 제동제어 및 타행제어도 실행되었으나 곡선 및 상, 하구배 등의 선로조건을 고려한 효율적인 가·감속제어가 이루어지지 않고 3단계 형태의 속도제한 조건에 맞춰 순간적인 역행, 타행 및 제동제어를 반복하며 운행하므로 에너

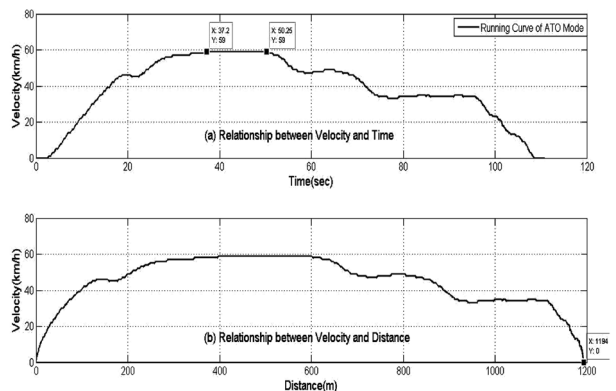


Fig. 11. Real running curve at ATO mode. (Yongmoon → Tanbang)

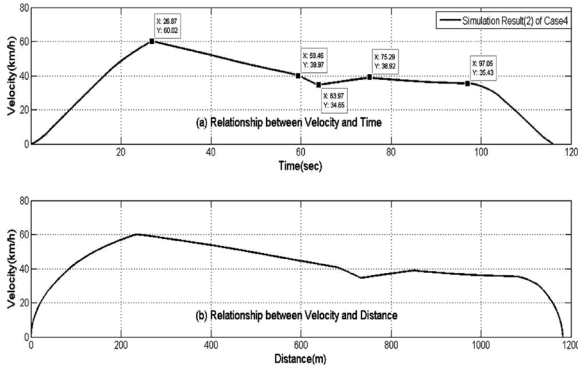


Fig. 12. Simulated velocity profile according to track conditions, (Yongmoon → Tanbang)

지 사용의 효율성이 떨어지게 되는데, 그 이유는 순간적으로 발생된 회생에너지는 같은 전력구간을 운행하는 회생 전동차와 역행 전동차의 순간적인 오버랩을 제외하고는 전동차 내 저항기 또는 전차선의 저항에 의해 열로서 사라지기 때문이다.

Fig. 12는 동일한 승객하중조건으로 용문-탄방역 하선구간의 곡선 및 상, 하구배 등 선로조건을 고려하여 도출한 MCS 운행패턴의 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프이다.

전동차의 운행패턴을 역행, 타행 및 제동제어로 간략화하고 급곡선 구간에서의 자연적인 제동효과로 견인력이

Table 6. Comparison of running patterns.

Classification	Results of Operation & Simulation		
	ATO Mode	Simulation Results	
Running Time	115 sec	115 sec	
Max. Speed	59.0 km/h	60.0 km/h	
Coasting Control	(1)	Start Point	26.9 sec
		End Point	
	(2)	Start Point	59.5 sec
		End Point	
	(3)	Start Point	75.3 sec
		End Point	
	(4)	Start Point	97.1 sec
		End Point	
	(5)	Start Point	97.1 sec
		End Point	
(6)	Start Point	97.1 sec	
	End Point		
(7)	Start Point	97.1 sec	
	End Point		
(8)	Start Point	97.1 sec	
	End Point		
Energy [kWh]	Powering Energy	10.47	8.75
	Regenerated Energy	0.46	0.26
	Consumed Energy	10.01	8.49
	Saving Effect	※ 10.01-8.49=1.52 [kWh, △15.2%]	

※ The energy is calculated in simulation.

부족하여 정위치정차를 도달하지 못하는 문제점을 부분적인 역행과 제동제어를 추가, 시뮬레이션 수행함으로써 주행시간 및 정위치정차에 필요한 운행거리를 동시에 만족시킬 수 있었다.

시뮬레이션 결과로서 선로특성에 따라 역간 운행시간과 거리 및 속도제한 조건을 모두 만족시킬 수 있는 타행시작점과 종료시점을 찾아내어 에너지 소비를 최소화⁴⁾하고 운행패턴을 단순화시킬 수 있음을 확인하였다.

Table 6은 상기 구간을 ATO 모드로 운행하였을 때와 운행패턴을 단순화하고 타행제어를 고려한 MCS 모드의 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

전동차의 운행시간은 115 sec로 ATO 모드와 같았으나 60 km/h까지 가속하여 탄력에 의한 운동에너지와 +13% 상구배 구간을 활용한 타행제어로 운행속도를 서서히 낮추며 에너지 사용량을 최소화한 후, 다시 11.3 sec 동안의 PI 역행제어 및 -3% 하구배 구간을 활용한 타행제어를 21.8 sec 수행하고 제동제어로 전환함으로써 3단계 속도제한 범위 내에서 운행패턴을 단순화함과 동시에 에너지 사용량을 15.2% 절감할 수 있었다.

3.2.5. 슬립현상의 최소화 (모델 5)

모델 (5)는 전동차가 15.86 ton의 승객을 태우고 탄방-시청역 하선(748 m)구간을 표준운행시간 75 sec와 속도제한 조건 50-65 km/h 내에서 ATO 모드로 운행한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 이 구간은 계속적인 하구배와 R=300의 급곡선 구간이 존재하며 속도제한이 2가지 계단형태로 설정된 선로특성을 가지고 있다.

TDIC에 기록된 전동차 ATO 운행데이터를 분석해 보면 역 출발 후 최대 가속력으로 1차 속도제한(50 km/h) 범위까지 계속 추진했으나, 차륜과 레일의 마찰력보다 구동력이 커서 차량속도보다 차륜 회전속도가 빠른 슬립현상이 출발 후 발생, 인버터의 출력감소 제어가 일정시간 실행⁵⁾됨으로서 운행시간이 표준운행시간보다 3 sec 늦어지게 되었다. 따라서 전동차 운행에는 문제가 되진 않지만 VVVF 인버터의 출력감소 제어가 실행되면 ATO 장치가 최대 견인력을 요구해도 실제 견인력이 30% 이상 낮게 발생되므로 1차 속도제한(50 km/h)까지 도달하는 시간은 길어졌으며, 2차 속도제한(65 km/h) 내에서 계속 추진한 후 짧은 시간동안

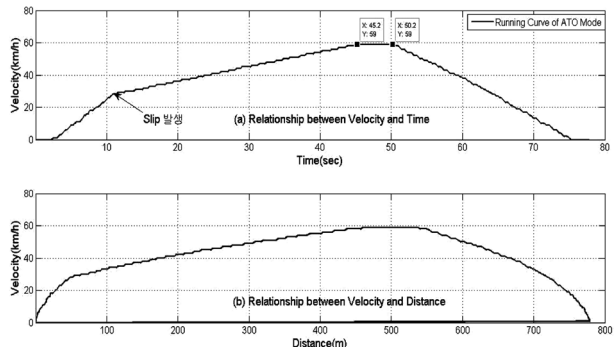


Fig. 13. Real running curve at ATO mode, (Tanbang → City Hall)

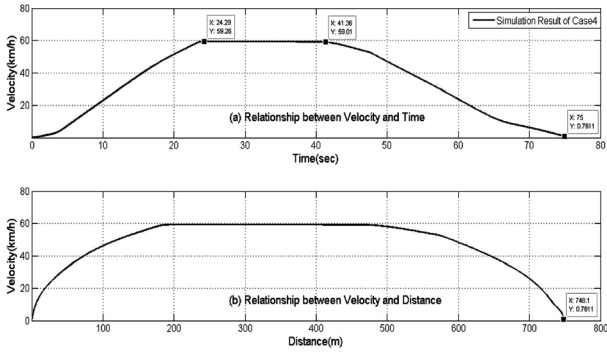


Fig. 14. Simulated velocity profile considering minimization of slip phenomena. (Tanbang → City Hall)

Table 7. Comparison of running patterns.

Classification		Results of Operation & Simulation	
		ATO Mode	Simulation Results
Running Time		75 sec	75 sec
Max. Speed		59.0 km/h	59.3 km/h
Coasting Control	Start Point	45.2 sec	24.3 sec
	End Point	50.2 sec	41.4 sec
Energy [kWh]	Powering Energy	7.41	5.98
	Regenerated Energy	1.08	0.94
	Consumed Energy	6.33	5.04
	Saving Effect	※ 6.33 - 5.04 = 1.29 [kwh, △20.4%]	

※ The energy is calculated in simulation.

타행제어로 59 km/h를 유지하다 서서히 제동력을 발생시켜 갑작스런 흔들림을 방지하며 정위치정차를 위한 제동제어로 전환하여 정지하였다.

ATO 모드에서 곡선 및 상, 하구배 등의 선로조건 및 표준운행시간을 충분히 활용하지 못하여 운행시간 지연에 영향을 주는 슬립현상이 발생됨으로서 에너지 사용의 효율성이 떨어지는 결과가 나타났다.

Fig. 14는 동일한 승객하중조건으로 탄방-시정역 하선 구간의 곡선 및 상, 하구배 등 선로조건을 고려하여 슬립현상이 발생되지 않게 출발제어 가속도 패턴을 낮추고 MCS 운행의 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프이다. 전동차의 운행시간은 75 sec로 ATO 모드와 같았으나 슬립현상이 발생되지 않는 출발패턴으로 59.3 km/h까지 가속하여 탄력에 의한 운동에너지와 -8 % 하구배 구간을 활용한 타행제어로 운행속도 59 km/h를 유지하며 에너지 사용량을 최소화한 후, 제동제어로 전환함으로써 에너지 사용량을 20.4% 절감할 수 있었다.

Table 7은 상기 구간을 ATO 모드로 운행하였을 때와 슬립 및 타행제어를 고려한 MCS 모드의 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

모델 (5)의 시뮬레이션 결과로 슬립현상이 잘 발생하는 특정 구간의 경우, 최대 가속력 내에서 슬립현상이 발생되지 않는 제어패턴으로 출발하는 것이 타행제어를 최대한 활용할 시간을 확보할 수 있으므로 에너지 절감에 효율적임을 증명하였다.

4. 결론

금번 연구는 다양한 조건으로 전동차 주행에너지 소비에 대한 시뮬레이션을 수행하여 ATO 시스템 전동차의 운행 안전성과 신뢰성을 확보하고 주행에너지의 사용효율을 최적화할 수 있는 ECO 운행패턴을 찾는데 그 목적을 두었다. 현재 운행되고 있는 전동차 ATO 운행패턴의 문제점을 개선하기 위하여 5가지 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하여 도출한 운행패턴은 승객과 기계장치의 안전에 영향을 주는 비상제동 체결을 최소화하며, 급격한 가·감속의 금지, 타행 및 정속주행으로 안전한 운행속도를 유지할 수 있어 주행에너지를 약 15% 절감하고 환경의 질을 개선시킬 수 있는 ECO 운행패턴으로서 ATO 시스템에 적용할 수 있으며 실제 운영에 사용하면 그 효과는 매우 클 것으로 판단된다.

1) 열차 안전운행에 필수적인 속도제한조건을 만족하면서 곡선반경 및 상, 하 구배 등의 선로조건을 충분히 활용하면 역행 또는 제동제어를 수행하지 않고도 부분적인 가·감속 제어가 가능하여 주행에너지의 소비가 없는 타행운행 시간을 최대한 길게 함으로써 현행 ATO 운행패턴보다 주행에너지를 약 10.2% 이상 절감할 수 있다.

2) 열차운행다이어를 계획할 때 고려된 +2%~+4%의 여유운전시분을 안전조건을 훼손하지 않는 조건에서 활용한 표준운전시분 내에서의 전동차 운행은 표정속도에 영향을 주지 않고도 현행 ATO 운행패턴보다 약 0.8%~3%의 주행에너지 절감효과가 있음을 확인하였다.

3) 선로조건 및 계절별 습도 등에 따라 슬립현상이 빈번하게 발생하는 구간에서 슬립현상을 방지하지 위하여 출발 또는 역행 시의 가속도 패턴을 3.0 km/h/s보다 낮춰 운행하면 정상제어 때보다 타행운행시간은 짧아지지만, 슬립현상으로 인한 VVVF 인버터의 출력감소로 정상속도까지의 가속시간이 늘어나게 되는 경우보다 주행에너지 사용량이 약 20.4% 절감됨을 확인하였다.

4) 급곡선 구간과 속도제한조건이 복잡한 형태의 구간에서도 선로특성에 따라 역간 운행시간, 거리 및 속도제한 조건을 모두 만족시킬 수 있는 타행시작점과 종료시점을 찾아내어 빈번한 역행 또는 제동제어를 수행하지 않고도 가·감속 제어가 가능하여 현행 ATO 운행패턴보다 약 15.2~23.9%의 에너지 소비를 절감하고 운행패턴을 단순화할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글: 이 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1) Han-Min Lee, Gil-Dong Kim, Cheon-Heon An, Young-Gyu Kim and Tae-Seok Kim, "Field Test of Energy Storage System on Urban Transit System", Journal of Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, pp. 1461~1467, 2009.

- 2) 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.
- 3) Jong-Deuk Lee, “Railway Engineering”, Noh-Hae Publishing Company, pp. 368~377, 2005.
- 4) Moon-Ho Kang and Moon-Seob Han, “A Train Performance Simulation using Simulink for Generating Energy-efficient Speed Profiles”, Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 59, No. 10, pp. 816~822, 2010.
- 5) Jae-Hyun Lee, “The Basic Principle of VVVF Inverter System”, Hyundai Heavy Industry Manual, pp. 9~18, 2004.