ATO 자동운전 기반의 무인운전 경전철 TPS에 관한 연구

A Study on TPS based on ATO for Driverless LRT

이창형†　　이종우**

Lee, Chang-Hyung　　**Lee, Jong-Woo**

ABSTRACT

Automatic Operation based on ATO (Automatic Train Operation) is necessary for driverless Light Rail Transit business. When this kind of driverless LRT operation plan is made, TPS (Train Performance Simulation) is traditionally simulated at all-out mode and coasting mode based on manual operation. Commercial schedule speed equals to all-out speed minus 9~15% make-up margin. Coasting mode TPS simulation is also run at commercial schedule speed to calculate run time and energy consumption. But TPS based on manual operation should make an improvement on accuracy in case of driverless LRT operation Plan.

In this paper, new fast mode TPS simulation using ATO pattern is proposed and show near actual ATO result. The actual ATO pattern can be accurately simulated with the introduction of 4 parameters such as commercial braking rate, jerk, station stop profile and grade converted distance. Normal mode TPS simulation for commercial schedule speed can be designed to have fast mode trip time plus 3 seconds/km margin recommended by korean standard LRT specification.

1. 서 론

최근 국내외 무인운전 경전철시스템에는 ATO(Automatic Train Operation)기반의 자동운전이 필수적으로 채택되고 있다. 그러나 이러한 무인운전 경전철 운전계획에 사용하는 TPS(Train Performance Simulation)는 기존의 수동운전 개념의 All-out mode와 Coasting mode를 수행하여 운행시간과 표정속도를 산출하고 있는 실정이다. 수동운전 기반의 TPS는 All-out mode의 시뮬레이션 결과에 9~15%의 Make-up 여유를 더하여 상업운전 표정속도를 설정하고 Coasting mode의 결과로 역간 운행시간, 전력소모량 등을 산출한다. 그러나 이러한 수동운전 기반의 TPS는 ATO기반의 무인운전 경전철 운전계획에 적용 시 정밀도에 있어 개선이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 실제와 같은 ATO용 TPS를 얻기 위하여 상용감속도, 저크, 역정차프로파일, 구배환산거리의 도입을 통해 정밀하게 모사될 수 있도록 하여 실제 ATO 운행패턴에 근접한 정밀한 시뮬레이션을 방법을 제시하고, Fast mode의 표정속도를 산출하였다. 또한 Fast mode 시뮬레이션 결과에 경전철 표준사양에서 권고하는 km당 3초의 여유를 더하여 Normal mode의 상업 표정속도를 산출할 수 있다. 제안된 ATO 기반의 무인운전 경전철 운전계획 TPS는 실제 운전과 비교하여 제안된 방법의 신뢰성을 검증하였다.

† 책임저자 : 정회원, 포스코건설, 경전철사업그룹, 차장
E-mail : chlee@poscoenc.com
TEL : (02)3457-2483 FAX : (02)3457-2469
* 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 전기·신호공학과, 교수

2. TPS 일반

국내 TPS는 크게 세가지 용도로 사용되고 있다. 첫째는 차량제작사가 차량의 최대성능을 확인하여 설계에 반영하는 경우, 둘째는 운전계획 시 상업운전용 표정속도를 산출하고자 하는 경우, 셋째는 전력 시뮬레이션을 수행하여 변전소 위치 및 용량 등을 산출하기 위한 경우이다. 이러한 세가지 용도의 TPS software는 각 전문분야 별로 별도 제작되어 적용되며 이에 따른 TPS 산출결과는 다소 차이가 발생하므로 항상 설계 오류의 가능성이 있다. 또한 이러한 TPS는 과거에 개발되어 대부분 수동운전에 기초하여 개발된 모델이다.

All-out mode TPS는 차량의 성능확인 및 차량설계용으로 영업운행에서 달성하기 어려운 극한값으로서 운전계획 및 전력시뮬레이션 용도로 적합하지 않다. All-out mode에서 산출된 표정속도에 9~15%의 Make-up 여유치를 추가하여 상업용 표정속도를 산출한다. 그러나 적정 Make-up 값은 노선의 특성에 따라 달라질 수 있으며, 기존 노선의 경험적 기준값을 적용하며 주로 15% Make-up 여유치를 많이 적용하였으나 최근 표정속도 향상을 위해 Make-up 여유치를 줄이고 있는 실정이다. 그러나 이러한 Make-up 여유치를 타당한 과학적 근거없이 일방적으로 줄일 경우, 실제 영업운전 시 표정속도 달성이 불가능한 상황이 올 수 있다.

따라서 실제 영업운전에서 달성 가능한 최고 표정속도를 파악하여 적정 운전시간 여유치를 추가하는 방법이 가능하도록 TPS결과의 정밀도가 개선되어야 한다.

ATO 운전시 ATO에서 달성 가능한 최고 표정속도 혹은 회복운전 시 적용이 가능한 최고 표정속도를 달성 가능한 운전모드의 개념이 필요하며 기존의 All-out mode와 구분하기 위하여 Fast mode로 정의하고자 한다. [표 1]은 두가지 모드의 특징과 차이점을 비교 설명하고 있다.

표 1. All-out Mode 및 Fast Mode 비교표

구분	All-out Mode	Fast Mode
특징	차량성능 최고 운전곡선 생성	ATO 최고 운전곡선 생성
속도	최고 운행속도 적용	ATO 최고 운행속도 적용
가속도	정격 가속도 적용	정격 가속도 적용
감속도	정격 감속도 적용	상용 감속도 적용
저크	국내 미적용, 해외 적용	적용
역정차 프로파일	1단 정격 감속도 적용	2단 혹은 3단 감속도 적용

3. ATO 기반의 TPS 적용 방안

최근 무인운전 경전철시스템에 필수적으로 채택되는 자동운전 ATO는 차량제작사가 아닌 신호제작사가 설계 및 공급하고 있으며 상업용 표정속도에 대한 최종 성능보증을 책임진다. ATO는 차량의 최대성능을 이용한 최고속도, 정격감속도 등을 100% 이용하지 않고 속도계 오차, 제동성능저하, 에너지 절감, 지연 시 회복운전 등을 고려하여 정상운전용 속도, 상업용 감속도 등을 적용한다.

또한 승차감을 위한 저크, 정위치정차의 신뢰성 확보를 위한 역정차 프로파일로 역간 운행시간이 증가한다. 특히 역정차 프로파일은 Speed code 혹은 Distance to go 등의 신호방식에 따라 크게 달라질수 있다.

해외 ATO 공급업체인 THALES 및 US&S사의 역정차 프로파일은 Distance to Go방식으로 상용 감속도로 감속한 후 Crawl mode의 저속으로 최종 정차하는 2단 제동방식을 적용한다[2,3].

실제 ATO 운행패턴에 근접한 정밀한 TPS기능은 주행시간이 상업운전에 최대한 유사한 시뮬레이션이 가능하도록 아래의 기능들이 추가되어야 한다.

3.1 ATO용 TPS Parameters

1) 상용감속도

차량분야에서 제공하는 최대 감속도는 Dry condition에서의 최고 감속도로서 정격감속도로 정의될 수 있다. 그러나 ATO 운전시 적용되는 상용감속도는 정격감속도와 달리 Wet condition 등의 여러 가지 요인을 고려한 상용감속도로 정의된다. 일반적으로 상용감속도는 정격감속도의 80~90% 수준이다.

2) 저크(Jerk)

저크는 기존 국내의 TPS 시뮬레이션에서는 고려하지 않고 있으나 상업운전 요건에서는 반드시 필요한 기능으로 ATO 운전에 적용되고 있으며 이러한 저크제한으로 인하여 상업운전 시 역간 주행시간이 늘어난다. 이러한 시간지연을 반영할 수 있도록 저크 기능이 추가되어야 한다.

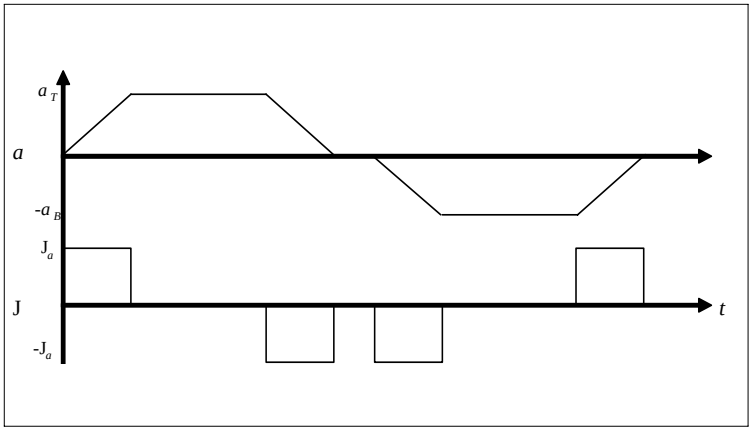

그림 1. 저크에 따른 가감속도 변화

3) 역정차 프로파일

ATO 운전에서 역간 주행 시 역정차를 위한 정위치 정차 감속도는 상용 감속도와 다른 프로파일이 적용된다. 역정차 프로파일은 1단 제동(단일 감속도 적용)으로 정위치 정차의 신뢰성을 확보하기 어려워 2단(고속으로 감속 후 저속으로 감속) 혹은 3단 제동을 수행한다. 이러한 ATO의 역정차 프로파일 적용에 따라 역간 주행시간이 늘어난다.

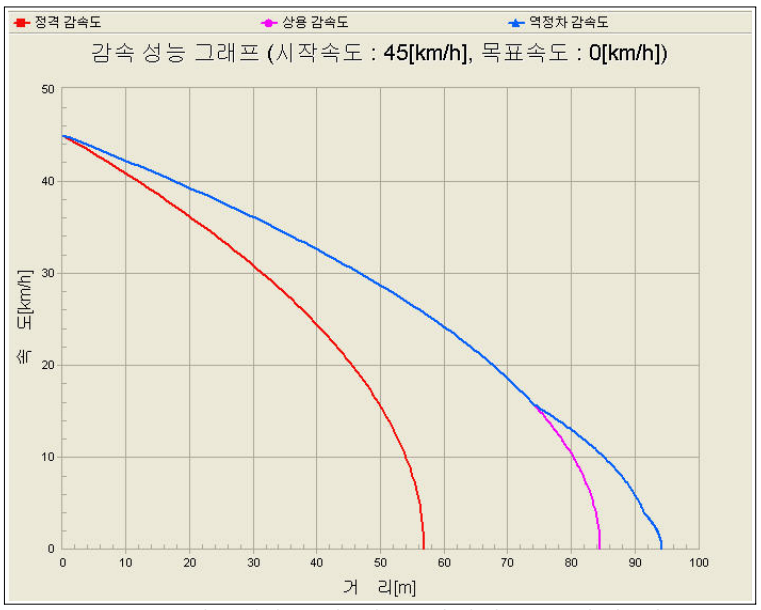

그림 2. 제동감속도에 따른 역정차 프로파일 비교

4) 구배환산거리

토목 선형분야에서 제공된 도면에 표시된 거리정보는 곡선에 의한 연장증가는 반영되어 있지만 구배에 의한 연장증가는 반영되어 있지 않다. 일반적으로 이러한 구배에 의하여 실제 주행거리는 증가한다. 따라서 구배에 의한 실제 운행거리 증가를 반영할 수 있도록 하여야한다. 경전철과 같이 급구배가 많은 노선의 경우 구배환산거리에 의한 오차가 더욱더 커질 수 있다.

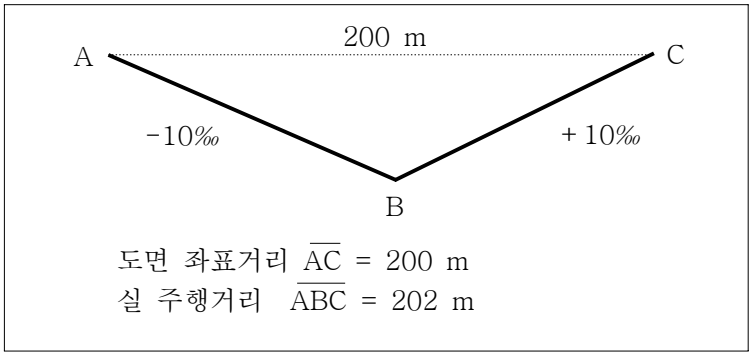

그림 3. 구배환산거리 특성

위에서 소개된 네가지 ATO기반 TPS의 추가 기능에 따른 주행시간의 증가예를 [표 2]에 정리하였다. [표 2]에서는 All-out mode와 Fast mode의 결과가 14.65% 차이가 발생한다. 이러한 경우는 All-out mode 결과에 15% Make-up 여유치를 추가하여 상업용 표정속도를 산출할 경우 실제 가능한 운전여유는 0.35%로 상업운행시 표정속도가 저하되거나 회복운전시 여유를 확보할 수 없다.

표 2. ATO기반 TPS 추가 기능적용에 따른 주행시간 증가 예

구분	주행거리 [m]	주행시간 [sec]	증가율	비고
All-out(1)	1,000	70.3	+0.00%	정격 감속도 = -1.3m/s^2
상용감속도(2)	1,000	73.5	+4.55%	상용 감속도 = -0.9m/s^2
(2)+저크적용(3)	1,000	74.9	+6.54%	저크 = 0.65m/s^3
(2+3)+역정차 프로파일(4)	1,000	79.8	+13.51%	감속도 = -0.9⇒-0.5⇒-0.2m/s^2
(2+3+4)+구배환산(5)	1,000	80.6	+14.65%	+11m 증가
Fast Mode		80.6	+14.65%	

3.2 ATO 기반의 TPS 비교 검증

본 본문에서 제시된 ATO 기반 TPS를 이용하여 서울도시철도 6호선 차량의 시험구간 ATO 실제 주행 결과를 비교 검증 데이터[1]로 사용한다. 시험구간의 선로조건은 [표 3]과 같다.

표 3. Real simulation conditions

Inter-station distance [m]	Scheduled time [sec]	Curve [m]	Speed limit [km/h]	Passenger loads [ton]
998	90	R=567(137m)	65-80-60-55	8
Gradient [‰]	0-168 m	168-548 m	548-947 m	947-1000 m
	-8.0	16.0	-15.5	2.0

시험구간의 ATO 현차시험 결과는 [그림 4]에서 보여진다.

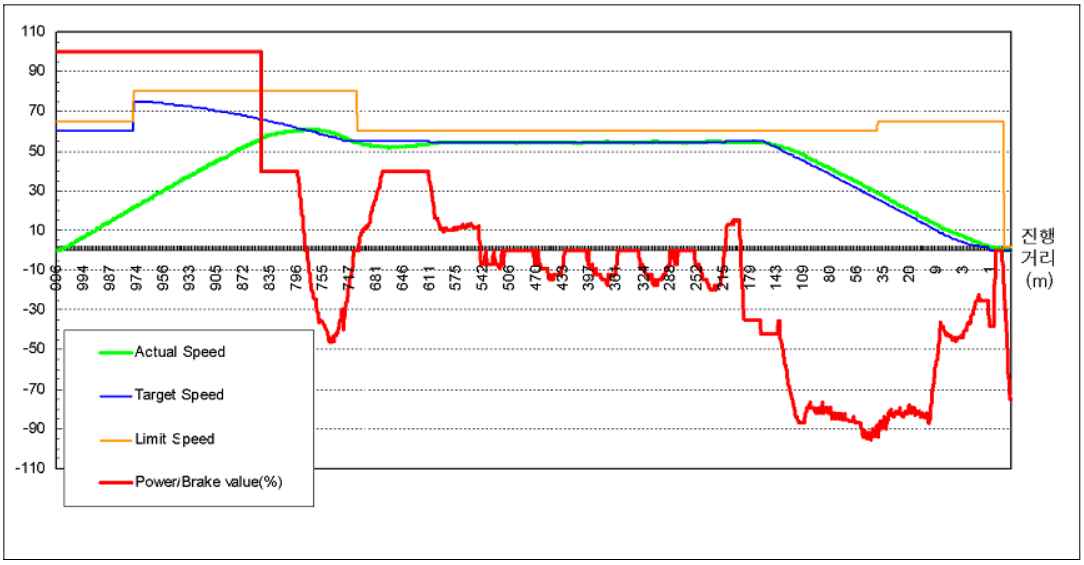

그림 4. 시험구간의 현차시험 결과

동일한 조건을 사용하여 ATO기반 TPS의 네가지 기능을 이용한 시뮬레이션 결과를 [그림 5]에 나타내었다.

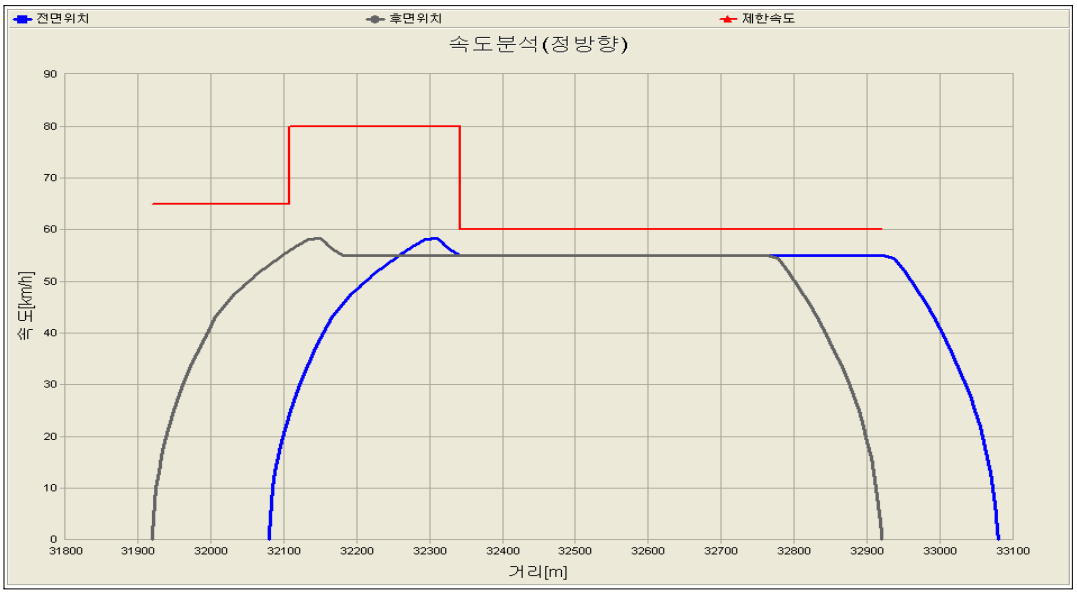

그림 5. 시뮬레이션 운전곡선도

ATO 기반 TPS를 이용한 시뮬레이션 결과와 서울도시철도 6호선 차량의 주행자료[1]의 ATO 실제 주행 결과와의 비교한 요약 표는 [표 4]와 같다.

표 4. ATO기반 TPS 결과 요약 표

항목	현차시험 결과(논문)	ATO 기반 TPS 시뮬레이션 결과
주행거리	998 m	좌동
계획운행시분	90 sec(여유운전시분 포함)	-
운행방향	하행선(A역->B역)	좌동
운전모드	ATO	ATO
운전시간	87 sec	86.4 sec
운전시간 오차율		-0.7%

3.3 ATO 기반의 TPS시 상업용 표정속도 산출 방안

상업운행 시 정상 운행모드를 Normal mode로 정의할 수 있으며 지연 시 회복운전을 위하여 Fast mode와의 운전여유시간이 필요하다. Normal mode TPS는 Fast mode TPS 결과에 국내 경량전철 표준사양[4]에서 제시하는 1km당 3초 이상의 예비시간을 가지도록 계획하여야 한다.

운행지연 시 ATO 회복운전 전략은 1차적으로 역 정차시간의 축소 및 2차적으로 역간 운행시간의 축소하는 절차를 가진다[2,3]. 따라서 3초의 예비시간을 역 정차시간과 역간 운행시간에 적절한 배분이 필요하다. 예를 들면, 역간 간격이 1km일 경우 정치시간에 2초 예비시간을 역간 운행시간에 1초의 예비시간을 할당할 수 있다. 역간 운행시간에 1초 예비시간을 할당할 경우 최고 운전속도 혹은 가·감속도를 줄여 에너지 절약형 운전을 수행할 수 있다. 최고 운전속도가 70km/h일 경우 Normal mode에서는 65km/h의 속도로 운행하며 Fast mode일 경우 70km/h로 운행하는 전력을 사용할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 ATO 기반 TPS의 실제 ATO 운행패턴에 근접한 정밀한 시뮬레이션의 방안을 제시하고 정밀도의 검증 결과를 비교하였다. 또한 Fast mode 기준의 TPS와 국내 경량전철 표준사양에서 제시하는 1km당 3초의 예비시간을 고려한 Normal mode의 상업용 표정속도를 산출하는 방안을 제시하였다.

향후 연구로서는 예비시간을 역 정차시간과 역간 운행시간에 최적으로 분배하는 방안과 주어진 역간 운행시간의 예비시간을 활용한 에너지 절약형 운전패턴에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 김재영 (2003), “도시철도차량 운행에 있어 에너지 절감을 위한 자동운전패턴에 관한 연구”, 석사학위논문, 서울산업대 철도전문대학원.

2. 부산~김해 경량전철 민간투자사업 (2005), “부산~김해 경량전철 신호분야 실시설계 보고서”.

3. 우이-신설 도시철도 민간투자사업 (2007), “우이~신설 경량전철 신호분야 기본설계 보고서”.

4. 건설교통부 (1998), “도시철도차량 표준사양”, 건설교통부고시 제1998-53호.