

도시철도차량용 자동/무인운전제어장치(ATO) 개발 및 본선시운전에 관한 연구

•한성호, 안태기, 이수길
한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단

Test running and Development of Automatic/Driverless Operation Equipment for EMU

•Seong-Ho Han, Tae-ki Ahn, Su-gil Lee
Urban Transit Engineering Department Korea Railroad Research Institute

Abstract - The automatic/driverless operation which are great important techniques in metro railway are required to increase higher safety, greater reliability, and transport capacity. To satisfy such demands, we must have the system design and testing technique for the railway system operation. These techniques are related to the onboard train control and communication systems which include TCMS(Train Control and Monitoring System), ATO(Automatic train Operation), ATC(Automatic train Control), and TWC(Train to wayside communication). These sub-systems must be interfacing with not only each others but also the signal system on the ground. We tested the train control system on the 7 line that has been developed on the basis of the standardized type EMU for korea railway systems.

1. 서 론

최근 도시철도차량의 운전기술 향상에 힘입어 자동/무인운전이 가능하게 됨에 따라 관련 기기의 고장 및 사고율의 최소화화를 위하여 시스템에 대한 보다 높은 안전성과 신뢰성이 요구되고 있다. 자동/무인운전기술은 차량의 제어기술 뿐만 아니라 지상 신호설비의 통신방식과도 밀접하게 관련되어 있어 이들의 차상 제어방식과 지상신호 인터페이스 기법에 따라 다양한 시스템의 구현이 가능하다.

국내 도입된 시스템들은 전진 외국의 여러 가지 다양한 운전기술 개념을 토대로 설계되어 있어 전동차 수명내용 년한이 25년으로 규정된 국내의 경우를 고려할 때 사용 운영자는 향후 발생할 유지보수비용과 부품조달의 어려움을 안게된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 국내 기술에 의한 시스템 설계기술과 시험기술 확보가 시급하며 최근 이를 위한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하고자 국내,외에서 운영중인 자동/무인운전 제어기술과 관련된 시스템의 기능사양을 분석하고 이를 토대로 표준사양을 만들었으며 또한 이를 검증하기 위하여 핵심기술을 개발하였다. 개발품의 신뢰성 시험을 위하여 구성품 시험, 조립시험, 완성차 시험, 공장구내 시운전 시험의 실시뿐만 아니라 현재 영업운전노선인 7호선 본선시운전을 실시하므로써 시스템의 안전성을 입증하였다.

표준전동차에 적용된 자동/무인운전기술은 현재 국내에서 열차위치검지기법으로 일반적으로 사용하고 있는 궤도회로 기반의 고정폐색방식(fixed block)을 적용하였으며 차량 운전 에너지의 최소화화를 위하여 속도대역(speed band)내에서 타형제어를 사용하는 최적제어기법을 구현하였다. 이 기술과 관련하여 산학연 협동연구로 핵심관련장치인 종합제어장치(TCMS), 열차자동제어장치(ATC), 열차자동운전장치(ATO)장치가 개발되었으며 7호선 본선시운전에서 종합인터페이스 시험을 함으로써 기능에 대한 신뢰성 검증에 마쳤다.

2. 표준전동차의 자동/무인운전 적응기술 개념

2.1 차상제어장치의 운전개념

도시철도차량의 차상제어장치는 운행중인 열차 상호간의 안전을 확보하고 선로의 이용률을 최대한 향상시키기 위해 열차의 진행방향 제어와 사고 예방기능을 수행한다. 차량 안전운행과 관련된 이들 장치에는 TCMS(train control and monitoring system), ATS(automatic train stop), ATP(automatic train protection), ATC(automatic train control), ATO(automatic train operation) 등이 있다. 열차 운전에 관한 효용성 증가를 위하여 이들 장치는 차량의 필요한 기초 성능을 결정짓는다. 열차 위치검지기법과 열차속도제어방법에 따라 시스템의 구현방식이 크게 다르게 되는 데 일반적으로 그림 1과 같이 속도단계제어방식(speed step control), 단일단계 제동제어기술(single step brake control), 이동폐색제어기술(moving block control)로 분류된다.

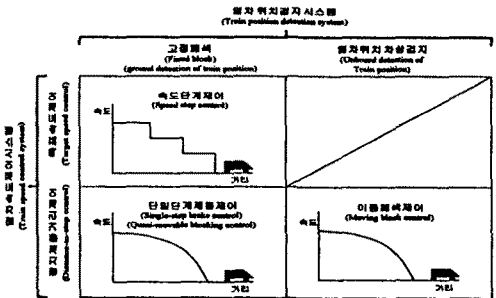


그림 1. 도시철도차량 자동/무인운전제어 기법의 분류

속도단계제어기법은 현재 국내 대부분의 도시철도에서 사용되고 있는 방식으로 열차위치검지를 위하여 트랙회로(track circuit)를 이용하는 고정폐색과 제한속도에 대한 목표속도를 설정하고 이를 추종하는 목표속도제어방식(target speed control)이 결합된 방법이다. 또한 최근 실용화 단계에 있는 기술로서 단일단계 제동제어기술이 있는데 이 기술은 고정폐색방식으로 차량의 위치검지를 하나 열차속도제어를 현재속도에서의 제동거리를 계산하여 선행열차와의 안전거리를 확보하는 정지제동거리(distance-to-stop)제어방식을 이용한다. 국내 부산 2호선의 경우 이와 유사한 방식을 사용하고 있으며 다른 용어로 준(quasi)이동폐색방식이라 분류되기도 한다. 경량전철에 사용되고 있는 이동폐색방법은 열차의 위치검지를 궤도회로가 아닌 차상에서 무선통신방식에 의하여 송수신하며 이를 통해 선행열차의 속도와 거리정보를 후행열차에 전달함으로써 속도제어를 distance-to-stop방식으로 처리하는 방법이다. 본 연구는 이상의 제어기법 가운데 국내에서 시험이 가능한 궤도회로를 이용하는 속도단계제어방식과 단일단계 제동제어기술을 적용하였다.

2.2 최적속도제어 프로파일

열차운행속도 프로파일은 고정된 폐색에 따라 주어지는 ATC 제한속도와 주어진 주행시간을 만족하면서 역간 거리사이에서 적절한 역행, 타행(coasting), 제동 모드를 반복적으로 전환하여 다양한 형태의 프로파일을 생성한다. 역행모드에서는 열차 추진을 위해 인버터와 전동기에서 에너지 소비가 발생하고, 제동모드에서는 전동기로부터 회생 에너지를 발생하여 가선으로 되돌려 준다.

타행모드에서는 에너지와 관계없이 관성에 따라 운행하므로 에너지의 소비나 생산이 발생하지 않는다. 따라서 에너지비용은 타행모드에서 역행모드로 전환하는 경우에만 주로 에너지소비가 발생하게 되며 타행과 제동모드 구간은 무시할 수 있다. 특히 에너지의 최소화를 위해서는 타행모드의 적절한 사용이 중요하며 트랙 및 차량운전 조건을 고려한 최적의 운행모드 전환점을 찾는 것이 관심사항이다.

이러한 에너지 소비의 최소화를 위한 최적운전제어기술은 저크한계, 주어진 운행시간, 열차저항 및 견인력/제동력 등을 고려하여 운행모드 즉 역행, 제동, 타행의 적절한 운영 전략을 세우는 것이 중요한 문제이다. 따라서 도시철도차량의 경우 전기에너지를 공급원으로 사용하기 때문에 이 문제는 주어진 운행시간을 만족하면서 적절한 타행운전 지점을 결정함으로써 에너지를 줄일 수 있는 속도 프로파일을 설정할 수 있다.

그림 2는 표준전동차 자동/무인운전 최적 속도제어 프로파일에 관한 패턴을 나타내었다. 초기 열차는 출발지점에서 저크율 0.8km/h/s^2 과 가속도 3.0km/h/s 을 만족하며 최대견인력(100%)으로 목표속도에 도달하게 되며 이후 목표속도를 유지하기 위해 정속도 제어를 실시한다. 정속도제어는 속도대역(speed band)를 설정하여 대역내에서 적절히 타행제어를 이용하므로서 일정 속도영역을 유지시키는 에너지 최소화 제어기법을 사용하였다. 열차가 정지역에 가까워짐에 따라 정확히($\pm 35\text{cm}$ 이내) 정차하기 위하여 정밀정차제어를 수행하는데 이를 위해 정지점까지의 남은 거리를 수시로 계산하여 현재 속도에서의 열차 감속도를 세밀하게 조정하여 단일 단계로 제동을 수행하는 distance-to-stop제어방법을 사용하였다. 이때 열차의 주행거리에 대한 정확한 계산을 위하여 지상에 정밀정차마커(PSM)를 사용하여 거리 오차를 보정하도록 하였다. 또한 정확한 열차의 자동/무인제어를 위하여 역간거리, 역코드정보, 영구제한속도, 구배, 커브 등을 데이터베이스화하여 열차제어에 반영하는 트랙데이터베이스 방법을 사용하였다.

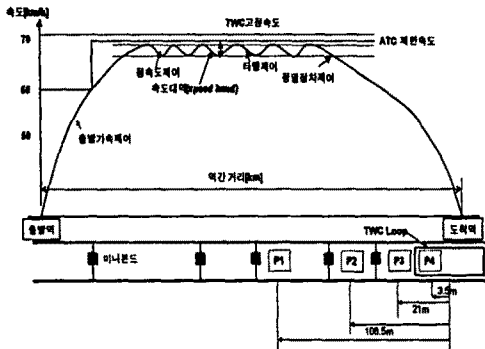


그림 2. 표준전동차 자동/무인운전제어 속도프로파일

2.3 자동/무인운전제어 시스템 개발

표준전동차의 자동/무인운전제어를 위한 TCMS는 신뢰성 향상을 위하여 편성제어컴퓨터(TC)백업기능을 사용하므로써 TC 고장시에도 차량제어컴퓨터(CC)를 통해 자동/무인운전제어가 가능하도록 구성하였다. 특히 제어기능의 안전성과 신뢰성 향상을 위하여 고 신뢰성 소프트웨어 설계 도구인 SCADE를 도입하여 제어로직의 오차한계를 철저히 제거하였으며 각 모듈별 개발에 따라 사전 시뮬레이터 검증을 실시하였다. ATO장치는 별도의 부 시스템으로 구성하였으며 실시간 운영체제(real time operating system)를 사용하여 통신타스크와 제어타스크 운영의 실시간성을 반영하였다. 특히 안전성 측면에서의 소프트웨어 기능을 강화하여 ATC나 TWC의 잘못된 입력정보에도 자가 상태전단이 가능하도록 고안되었다.

ATO장치는 기존의 Fail safe개념을 이용하여 주ATC와 보조ATC로 이중화 설계되었으며 CPU판넬의 LED를 통해 자가 진단이 가능하도록 고안되었다. 그림 3은 실제 표준전동차 선두차에 취부된 TCMS의 편성제어컴퓨터와 차량제어컴퓨터 유닛을 나타낸 것이며 우측사진은 ATO장치 유닛이 전면 모습을 보인 것이다. 또한 그림 4는 ATC/TWC/TRA가 전체 시스템 프레임에 결합된 상태를 나타낸 것이다. 사진에서 우측 상하부분이 각각 주 ATC와 보조 ATC를 가리키며 우측 상단에 TWC와 TRA를 나타낸다. 우측하단 부분은 좌측/우측 출입문 열림계전기와 비상제동 인가 계전기를 가리키며 주변 부 시스템과의 인터페이스를 위한 컨넥터 부위를 가리킨다.

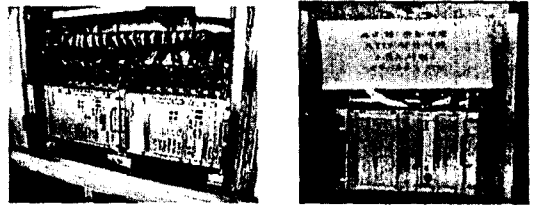


그림 3. TCMS와 ATO개발품 사진



그림 4. ATC/TWC/TRA개발품 사진

3. 본선(7호선) 시운전 결과

표준전동차의 본선시운전은 도시철도공사(SMRT)가 운영하고 있는 서울시 지하철 7호선 미개통구간(보라매←청담)약 13.6[km]에서 실시하였으며 노선설비에 대한 상세 정보는 표 1에 나타내었다.

이 구간은 서울시가 7호선 2단계 개통을 위해 시운전을 실시하고 있으며 본 차량은 이들 열차다이에아에 편성되어 시험하였다. 표준전동차 자동/무인운전제어 주행시험 결과를 속도-거리곡선으로 표현되는 속도 프로파일 형태로 나타내었다. 그림 5와 그림 6은 각각 TWC로부터 고정속도 75km와 70km로 설정되었을 경우 실제 자동/무인운전제어를 실시한 결과를 속도 프로파일을 나타낸 것이다.

표 1. 7호선 미개통구간 선로 정보

역명	상 선(서→동)		하 선(동→서)	
	거리(m)	폐색 수	거리(m)	폐색 수
보라매↔ 신대방삼거리	784	3	1,158	4
장승배기↔ 상도	941	3	938	3
상도↔승실대	908	5	906	4
승실대↔남성	1,973	8	1,976	5
남성↔이수	1,011	5	1,021	6
이수↔내방	1,042	7	1,030	5
내방↔ 고속터미널	2,204	8	2,206	7
고속터미널↔ 반포	916	4	919	4
반포↔논현	846	5	845	5
논현↔학동	994	7	994	6
학동↔ 강남구청	899	4	898	5
강남구청↔ 청담	1,108	5	1,105	6

그림 7은 7호선 본선에서 시험운행하고 있는 표준전동차의 모습을 보여주고 있다.

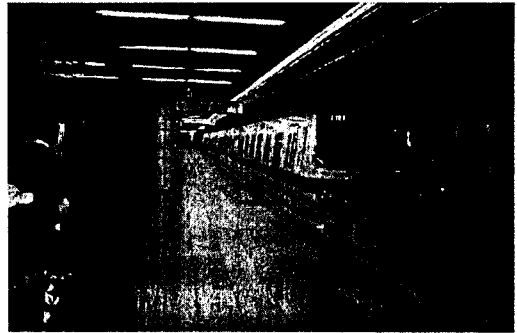


그림 7 표준전동차 7호선 본선 시운전 모습

4. 결론

본 연구는 표준전동차 국산화 제작과 관련하여 개발된 자동/무인운전제어 시스템의 개발과 시운전 시험결과에 대해 다루었다. 현재 국내에서 외국기술의 의존도가 가장 높은 이러한 기술을 국산화하고 시험평가하므로써 기술개발의 가능성을 확인 할 수 있었으며 설계 및 시험평가기술을 확보할 수 있었다. 특히 제작사에 따라 장치의 구성이나 크기, 취부 위치 등의 물리적 규격과 통신 방식, 사용 주파수 등의 신호 체계가 상이하여 국내 운영기관에서 겪고 있는 유지보수 문제 해결방안을 제시할 수 있는 기회를 마련하게 되었다. 그러나 다년간 영업노선에서의 운영실적을 바탕으로 한 외국제품들에 비해 객관적인 신뢰성 확보가 문제로 남아있다. 또한 시험선로의 미 확보로 다양한 지상신호설비와 연계한 다양한 시스템 적용 시험이 현실적으로 어려운 것이 아쉬운 문제점이다. 따라서 개발품의 신뢰성 확보와 신기술 선도를 위한 연구와 시험설비 구축 마련을 지속적으로 병행하여 추진해 나갈 것이다.

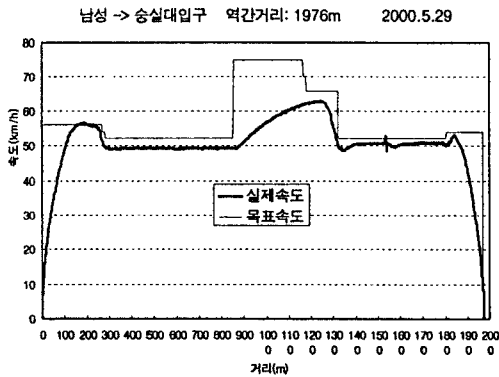


그림 5 남성→승실대입구 운행 속도 프로파일

[참 고 문 헌]

- [1] Tadashi Takaoka, "Onboard Train Control and Communication Systems for High-Efficiency Railway Systems", Hitachi Review, Vol 46, No.2, 1997
- [2] 한성호의 3명, "CASE tool을 이용한 전동차 제어감시장치(TCMS)의 소프트웨어 설계기법", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, A권 pp303-360. 1997
- [3] 한성호의 8명, "시뮬레이터 어닐링을 이용한 열차최적제어알고리즘 개발", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, A권 pp486-488. 1997.
- [4] 한국철도기술연구원, 건설교통부, "1999년도 종합제어장치 연구개발 보고서", 1999.

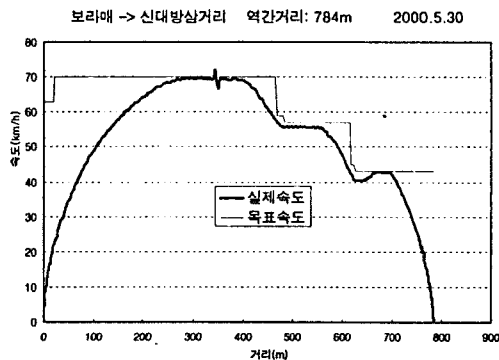


그림 6 보라매→신대방삼거리 운행 속도 프로파일