

표준전동차 자동/무인운전장치 개발 및 주행시험

Development and Test of Automatic/Driverless Operation System for Standardized EMU

안태기¹, 이수길¹, 한성호², 이관섭³

Tae-Ki Ahn, Seong-Ho Han, Su-Gil Lee, Kwan-Sub Lee

Key Words : Automatic/driverless control(자동무인운전), ATO(Automatic Train Operation), ATC(Automatic Train Control), Standardized type EMU(표준전동차)

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 Test line that has been developed on the basis of the standardized type EMU for korea railway systems. This test line which is located in Sangju, have been constructed for testing 7 & 8 line of Seoul Metro railway.

1. 서 론

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

현이 가능하다[1].

국내 도입된 시스템들은 선진 외국의 여러 가지 다양한 운전기술 개념을 토대로 설계되어 있어 전동차 수명 내용 년한이 25년으로 규정된 국내의 경우를 고려할 때 사용 운영자는 향후 발생할 유지보수비용과 부품조달의 어려움을 안게 된다. 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 또

*1정회원, 한국철도기술연구원 주임연구원

*2정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

*3정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원

한 이를 검증하기 위하여 핵심기술을 개발하였다. 개발품의 신뢰성 시험을 위하여 구성품 시험, 조립시험을 완료하였으며 표준전동차에 취부한 상태에서 완성차 시험과 시운전 시험을 실시하였다.

표준전동차에 적용된 자동/무인운전기술은 현재 국내에서 열차위치검지기법으로 일반적으로 사용하고 있는 궤도회로 기반의 고정폐색방식(fixed block)을 적용하였으며 차량 운전 에너지의 최소화를 위하여 속도대역(speed band)내에서 타행제어를 사용하는 최적제어기법을 구현하였다.

이 기술과 관련하여 산학연 협동연구로 핵심관련장치인 종합제어장치(TCMS), 열차자동제어장치(ATC), 열차자동운전장치(ATO)장치가 개발되었으며 7호선 시험선로로 사용되고 있는 상주 시험선로에서 종합인터페이스 시험을 함으로써 기능에 대한 신뢰성 검증을 마쳤다[2].

2. 자동/무인운전을 위한 적용기술 개념

2.1 차상제어장치를 이용한 자동/무인운전 제어 기법

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 효율성 증가를 위하여 이들 장치는 차량의 필요한 기초 성능을 결정짓는다. 열차 위치 검지기법과 열차 속도 제어방법에 따라 시스템의 구현방식이 크게 달라지는데 일반적으로 Fig. 1과 같이 속도단계제어 방식(speed step control), 단일단계 제동제어기술(single step brake control), 이동폐색제어기술(moving block control)로 분류된다.

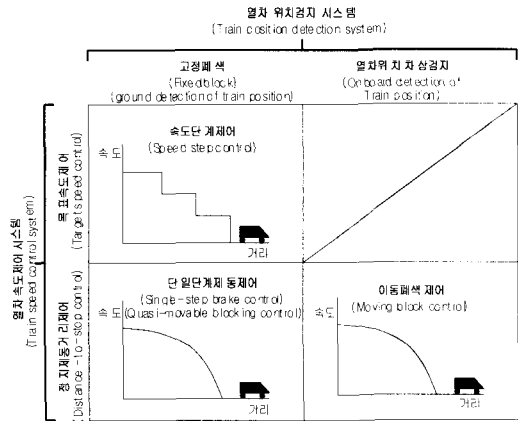


Fig. 1 Automatic/Driverless Control method

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 위치를 검지하지만 열차속도제어는 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 무선통신 방식에 의하여 송수신하며 이를 통해 선행열차의 속도와 거리정보를 후행 열차에 전달하여 속도제어를 distance-to-stop방식으로 처리하는 방법이다. 본 연구에서는 이상의 제어기법 가운데 국내에서 시험이 가능한 궤도회로를 이용하는 속도단계제어방식과 단일단계 제동제어기술을 적용하였다.

2.2 자동/무인운전의 최적 속도제어 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 에너지가 소비되고, 제동모드에서는 전동기로부터 회생 에너지가 발생하여 가선으로 되돌려진다.

타행모드에서는 에너지와 관계없이 관성에 따라 운행하므로 에너지의 소비나 생산이 발생하지 않는다. 따라서 에너지비용은 타행모드에서 역행모드로 전환하는 경우에만 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, 열차 저항 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 시점을 결정함으로써 에너지를 줄일 수 있는 속도 프로파일을 설정할 수 있다.

Fig. 2는 표준전동차 자동/무인운전 최적 속도제어 프로파일에 관한 패턴을 나타내었다.

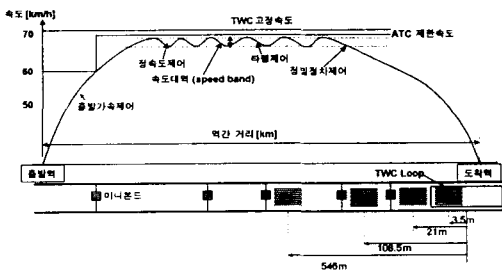


Fig. 2 Driving profile of the train using optimized driving control method

초기 열차는 출발지점에서 저크를 0.8 m/s^3 과 가속도 0.833 m/s^2 을 만족하며 최대견인력으로 목표속도에 도달하게 되며 이후 목표속도를 유지하기 위해 정속도 제어를 실시한다. 정속도 제어는 속도대역(speed band)를 설정하여 대역내에서 적절히 타행제어를 이용함으로써 일정 속도영역을 유지시키는 에너지 최소화 제어기법을 사용하였다[3][4]. 열차가 정차역의 정해진 지점에 정확하게 ($\pm 35 \text{ cm}$ 이내) 정차하기 위하여 정지점까지의 남은 거리와 현재속도에서 정지할 수 있는 제동거리를 연속적으로 비교한다. 현재속도에서 정지할 수 있는 제동거리는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 때 β 값은 0.833 m/s^2 과 최대상용감속도 0.972 m/s^2 사이의 값 중에서 표준전동차의 특성 및 승차감 등을 고려하여 적절한 값으로 선택한다.

$$S_0 = \frac{v^2}{2\beta} \quad (1)$$

여기서 S_0 : 제동거리 [m]
 v : 현재 열차속도 [m/s]
 β : 제동 감속도 [m/s^2]

현재 위치에서 정차역의 정지점까지 남은 거리가 식(1)에서 계산한 제동거리 보다 작은 경우 정밀정차제어를 수행하는데 이 때 감속도 값은 식(2)에 의해서 계산된다.

$$\beta_{ps} = \frac{v^2}{2S} \quad (2)$$

여기서 S : 현재 위치에서 정지점까지 거리 [m]
 β_{ps} : 정밀정지를 위한 감속도 [m/s^2]

이러한 계산은 250 msec 주기마다 이루어지며, 열차의 주행거리에 대한 정확한 계산을 위하여 지상에 정밀정지마커(PSM)을 사용하여 거리 오차를 보정하도록 하였다. 또한 제한 속도에 대한 예비감속 및 무인회차 등의 기능을 위한 역

간거리, 역코드정보, 영구제한속도, 구배, 커브 등을 데이터베이스화하여 열차제어에 반영하는 트랙데이터베이스 방법을 사용하였다.

2.3 시스템간 인터페이스 사양

표준전동차 자동/무인운전에 관련한 부 시스템(sub-system)으로는 TCMS, ATC, ATO, TWC, TRA(Trigger Receiver Assembly), ADU(Aspect Display Unit)가 있다. 이들은 시리얼 통신방식과 디지털 입·출력신호를 통해 상호 연계되어 있으며 동시에 지상신호설비인 ATC궤도회로, TWC 부프, 정밀정지마커(Precision Stop Marker)로부터 차량하부에 설치된 ATC안테나, TWC안테나, TRA안테나를 통해 무선 주파수방식으로 정보를 수신한다. 이와 관련된 인터페이스 사양과 송수신 데이터 종류를 Fig. 3에 상세히 나타내었다.

자동/무인운전제어를 위하여 ATC는 궤도회로로

부터 제한속도를 수신하여 ATO장치로 송신하며, TWC는 지상 CTC사령으로부터 현재역코드, 다음역코드, TWC 캐리어검지신호, 고장속도, 운행제어모드를 ATC와 ATO로 송신하여 준다.

TCMS는 ATO로부터 열차의 역행/제동을 위한 가감속율을 받아 추진제어장치(VVVF)와 제동제어장치(ECU)에 제어지령을 전송하는 역할을 수행한다. 또한 TRA는 디지털신호를 통하여 PSM검지 신호를 ATO에 전달하며, 이 신호를 검지한 ATO는 TRA로 리셋신호를 출력한다. 특히 ATC는 타코미터로부터 입력된 128펄스정보를 384펄스로 합성하여 ATO에 펄스입력으로 전달함으로써 ATO가 정확한 펄스 카운터에 따라 거리를 계산하도록 해준다. 무인운전제어는 운전실 활성화정보를 역전기가 아닌 지상으로부터 Key-Up신호를 수신하여 운전모드 유효를 설정하는 것과 출발버튼의 조작으로 사용하지 않는 점이 자동운전제어와 다른 점이다.

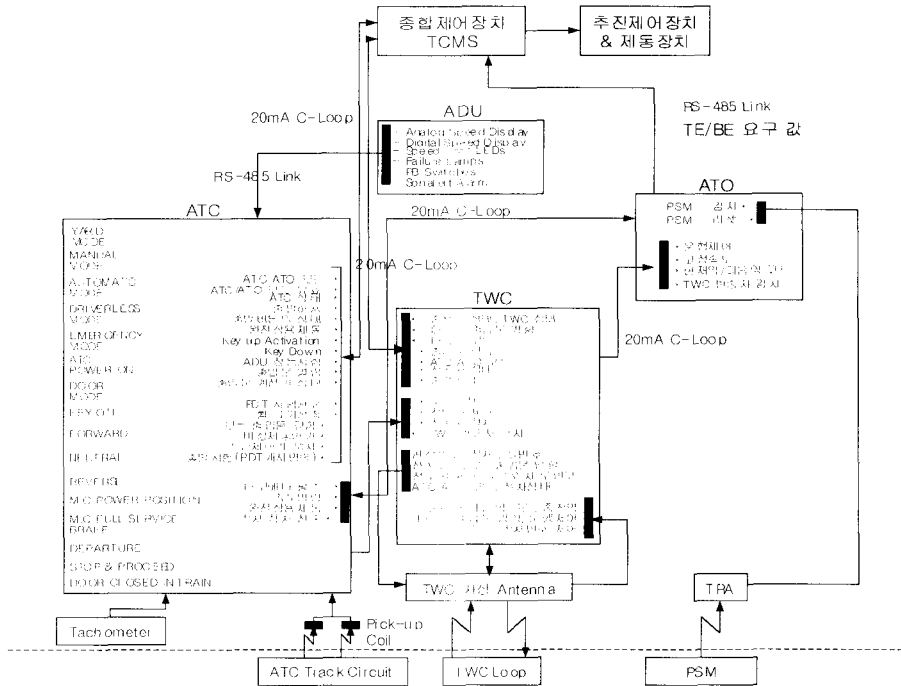


Fig. 3 Interface diagram for automatic/driverless driving control

2.4 표준전동차 자동/무인운전제어 시스템 개발

표준전동차의 자동/무인운전제어를 위한 TCMS는 신뢰성 향상을 위하여 편성제어컴퓨터(TC)백업기능을 가지고 있어 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 주프로세서는 MC68040의 32bit 방식의 프로세서를 사용하였다. 통신타스크와 제어타스크의 관리 및 운영을 위한 실시간 운영체제(Real Time Operating System)로는 VxWorks를 사용하였다. 특히 안전성 측면에서의 소프트웨어 기능을 강화하여 ATC나 TWC의 잘못된 입력정보에도 자가 상태진단이 가능하도록 고안되었다. ATC장치는 기존의 Fail safe개념을 이용하여 주ATC와 보조ATC로 이중화 설계되었으며 CPU판넬의 LED를 통해 자가 진단이 가능하도록 고안되었다. Fig. 4는 실제 표준전동차 선두차에 취부된 TCMS의 편성제어컴퓨터와 차량제어컴퓨터 유닛을 나타낸 것이며 우측사진은 ATO장치의 전면 모습을 보인 것이다. 또한 Fig. 5는 ATC/TWC/TRA가 전체 시스템 프레임에 결합된 상태를 나타낸 것이다. 사진에서 좌측 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 커넥터 부위를 가리킨다.

TCMS, ATC, ATO, TWC, TRA 등 표준전동차에 적용된 자동/무인운전제어 시스템은 현재 서울시 2기 지하철에 적용된 시스템 중 7&8호선 시스템과 완벽한 호환성을 가지는 시스템으로 설계되었다.

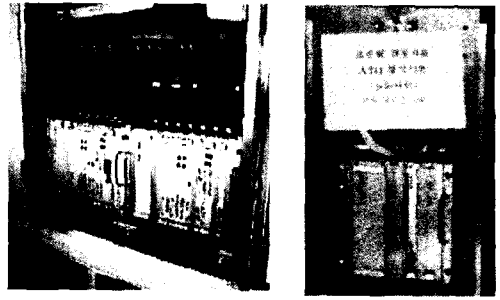


Fig. 4 TCMS and ATO



Fig. 5 ATC/TWC/TRA

3. 자동/무인운전제어 시험 실시 및 결과

3.1 자동/무인운전 시험 실시

표준전동차의 자동/무인운전제어에 관한 시험 절차는 본선 시운전시험 가운데 지상설비연계 동작시험 내용 속에 포함되어 있다. 주요 시험내용은 차량정차 상태에서 실시하는 정적시험과 차량의 주행을 통해 기능을 검사하는 동적시험으로 구분된다. 정적시험내용은 ADU동작시험, ATC동작시험, TWC시험이 있는데 특히 ATC동작시험에 있어서는 코드비 검지시험이 주요 검사항목으로서 캐리어 주파수로 변조되는 각종 속도코드, 출입문 코드, 운전모드 코드를 정확히 차상에서 수신하는지 여부를 시험하는 항목이다. 동적시험으로는 기지모드, 수동모드, 자동모드, 무인모드에 대한 초기 모드설정기능, 역간 주행기능을 시험하게되며 TRA검지 시험은 각 PSM의 해당주파수에 대한 주행 중 수신상태를 확인한다. 이외에도 비정상 조건시험이 있는데 주행 중 모드스위치 변경 조작에 따른 기능확인, 열차 정지점으로부터의 조기정차 조정기능, TCMS운

전 금지명령 수신시 동작시험이 있다. 다음은 동적 시험과 관련한 표준전동차 자동/무인 운전모드 초기화, 역간 주행절차, 운전모드 취소에 대하여 간략히 설명하였다.

(1) 자동/무인 운전모드 초기화

자동운전모드는 운전실이 활성화되어 있는 곳에서 승무원에 의해 초기화되며, 전동차는 자동 운전모드를 개시하기 위하여 지상의 TWC 루프 상에 위치하여야 한다. 이 루프는 각 역 또는 기지의 플랫폼 출구에 설치되며, 승무원은 주간제어기를 타행위치로 설정하고 운전모드 스위치를 자동 운전모드로 설정한다. 이때 전동차는 역 정보 및 경로 정보를 수신하여 지상과의 통신이 수립된 이후 역을 출발할 준비를 갖추게 되며 속도명령이 수신되고, 모든 출입문 닫힘 입력이 동작하면, ATC는 TCMS로 출발버튼을 점등시킴을 지시하며 이때 ATC는 승무원이 출발버튼을 누를 때 속도명령을 전송하게 된다. 무인운전모드는 무인모드 스위치를 설정한 상태에서 역전기를 중립에 두어 운전실을 비활성 상태로 유지하며 지상으로 부터 무인운전모드 허가가 있을 경우 KEY-UP 명령을 수신하여 무인운전모드를 유효하게 된다. 열차의 초기 출발은 지상 궤도회로에서 KEY-UP신호 대신 속도코드가 송신되면 ATC가 바로 ATO장치로 속도코드를 송신하므로써 열차가 출발하게 된다.

(2) 역간 자동/무인운전 주행

전동차의 운행은 ATO에 의해 제어되며, ATC는 속도명령 전송 및 속도제한을 수행하여 ATO를 감시한다. 자동 운전모드에서 승무원은 출발시간을 제어하며, 지상신호장치는 모든 출입문 열림 시간이 경과한 후에 전동차로 속도명령을 전송한다. ATC는 필요한 안전조건이 만족되었을 때 승무원에게 새로운 속도명령을 ADU와 TCMS모니터에 표시한다. 승무원은 출발버튼을 눌렀다 놓음으로써 전동차를 출발시키며 ATO는 다음 역까지 운행하여 정밀정지를 수행한다.

(3) 자동/무인운전모드 취소

자동운전모드는 승무원이 모드스위치를 타 모드로 변경하여 자동운전모드를 취소시킬 수 있다. 이는 전동차가 정지하였을 때 수행되어야 하며, 전동차가 움직이는 동안 모드스위치가 변경되면, ATC는 상용전제동(FSB)을 인가한다. 무인운전모드는 모드 스위치를 무인 운전모드에서 타 모드로 변경시키거나, 역전기에 Key를 삽입하거나 또는 전/후진으로 이동시킴으로써 취소된다. 이는 역 또는 회차지점에 정지하였을 때 수행되어야 하며, 이외에서는 FSB가 인가되어 정지하게 된다.

3.2 표준전동차 자동/무인운전 시험 실시 결과

표준전동차의 시운전은 KOROS가 운영하고 있는 상주공장 시험선로에서 수행하였으며 시험설비에 대한 상세 내용은 Fig. 6에 나타내었다.

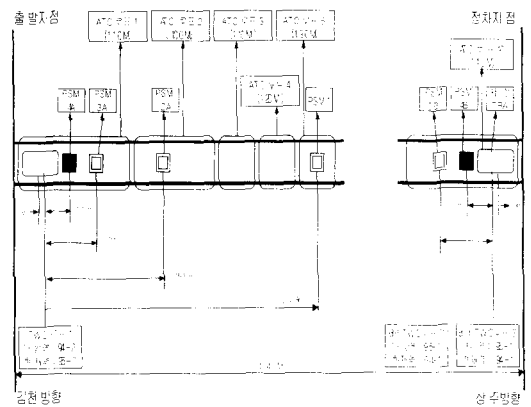


Fig. 6 Sang-ju Test track for Electric Multiple Unit

이 시험선로는 서울시 7호선과 8호선 2단계 신조차에 대한 구내시운전 시험을 실시하는 곳으로 6량과 8량 편성차량에 대한 시험만이 가능하도록 고안되었다. 전체 ATC 루프회로는 약 100 m 단위로 10 개가 구성되어 있으며 출발지점인 김천방향으로부터 정차지점인 상주방향까

지의 총 주행가능거리는 1.140 km이며 8량 편성을 위한 주행거리는 946 m이다. 지상시험설비는 사령실에 설치된 지상신호 시뮬레이터에 의해 수동으로 조작되며 무인운전의 경우 지상신호를 off-line으로 수동 처리되도록 설계되어있다.

위의 시험선로에서 8량 편성 주행시험을 위해 설치된 주행거리인 946 m를 기준으로 표준전동차의 자동/무인운전제어 주행시험을 하였으며, Fig. 7은 TWC로부터 고정속도 80 km로 설정되었을 경우 실제 정상적인 조건에서 자동운전제어를 여러 번 실시한 결과를 겹쳐서 나타내었으며, 이 때 정밀정차에러는 최대 -13 cm로 ± 35 cm 허용범위오차 이내에서 정밀정차제어를 수행하였다.

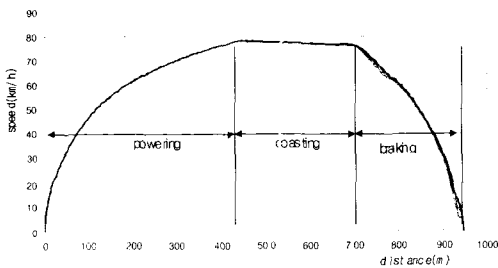


Fig. 7 Speed profile of the train using automatic train operation (fixed speed : 80km/h)

Fig. 8은 표준전동차가 상주시험선로에서 지상설비연계동작시험 중 자동/무인운전모드 시험을 실시하고 있는 실제 모습이다.

4. 결론

본 연구는 표준전동차 국산화 제작과 관련하여 개발된 자동/무인운전제어 시스템의 개발과 시운전 시험에 대해 다루었다. 현재 국내에서 외국기술의 의존도가 가장 높은 이러한 기술을 국산화하고 시험평가함으로써 기술개발의 가능성을 확인 할 수 있었으며 설계 및 시험평가기술을

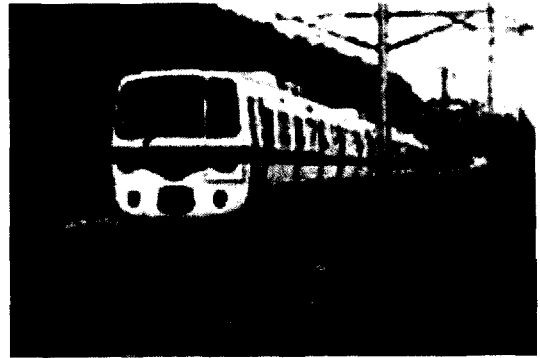


Fig. 8 Standardized Electric Multiple Unit for Testing

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.

참고문헌

1. Tadashi Takaoka, "Onboard Train Control and Communication Systems for High-Efficiency Railway Systems", Hitachi Review, Vol 46, No.2, 1997
2. 한국철도기술연구원, 건설교통부, "1999년도 종합 제어장치 연구개발 보고서", 1999
3. 한성호외 3명, "에너지 최소화를 위한 열차최적운전 제어기법", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, A 권 pp.365-367, 1998
4. 한성호외 8명, "시뮬레이터 어닐링을 이용한 열차최적제어알고리즘 개발", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, A 권 pp.486-488, 1997