전동차의 자동운전제어 시스템에 관한 시뮬레이션 기술

A Simulation for the Train Automatic Operation Control System

한성호*, 윤용기**, 안태기**, 김원경***, 조연옥****

Han, Seong-Ho Yoon, Yong-Ki Ahn, Tae-Ki Kim, Weon-Kyong Cho, Yun-Ok

ABSTRACT

The train automatic operation control system is an on-board train control system that is widely adopted in modern rapid transit systems. The control system consists of TCMS(Train Control and Monitoring System), ATC(Automatic Train Control), ATO(Automatic Train Operation) and TWC(Train to wayside communication) in the train and wayside facilities. The functions of the system is to regulate train riding comfort, to service limited speed and smoothness during start, acceleration, constant speed travel, and fixed point parking under the corresponding commands. The paper describes the simulation model of the train automatic operation control of subway system, configuration of simulator hardware and software and operational algorithms.

1. 서 론

최근 도시철도 차량시스템은 수송능력의 향상과 수명사이클비용의 축소, 고 신뢰성 및 안전성 등 보다 엄격한 시스템 사양을 요구하고 있으며 국내·외 도시철도차량관련 제작사들은 이러한 요구사양을 만족시키기 위하여 최신 자동제어 및 신호·통신기술을 토대로 하는 연구개발을 활발하게 진행해 오고있다[1,2,3].

특히 열차 자동운전제어기술은 차량의 무인/자동운전과 관련하여 열차 시스템의 안전성과 신뢰성에 아주 중요한 영향을 주는 핵심기술분야로서 최적 제어기술 및 신호·통신 인터페이스기술이 응용되며 이를 기반으로하는 시스템 설계기술 및 하드웨어, 소프트웨어 설계기술이 중요하다.

도시철도차량의 경우 자동운전제어시스템은 열차의 운행상태와 각 주변장치의 제어 및 감시기능을 수행하는 종합제어장치(TCMS: Train Control and Monitoring System), 자동운전시 운전자를 대신하여 열차의 속도조절과 역 정밀정지제어를 수행하는 열차자동운전장치(ATO: Automatic Train Operation), 열차속도가 제한속도를 넘지 않도록 열차의 탈선과 충돌을 방지해 주는 열차자동제어장치(ATC: Automatic Train Control), 차상과 지상 웨이사이드와의 통신을 처리하는 TWC(Train to wayside communication)와 같은 차상제어시스템으로 이루어져 있다[3,4]. 이 기술은 차상제어장치 뿐만 아니라 궤도회로(Track Circuit), 정밀정지표시기(PSM : Precision Stop Marker), TWC루프회로(TWC Loop) 등 지상신호설비와도 연계되어 동작하고 있으며 이들과의 상호 인터페이스 기술이 중요 기술분야이다. 그러나 이들 시스템 개발과 관련하여 새롭게 적용되는 제어기술은 시스템 신뢰성 확보와 성능검증을 위하여 충분한 시험을 실시해야 하나 현재 국내 여건상 실제 환경에서 운행차량을 대상으로 개발기술을 적용하기에는 시험트랙의 확보와 시험환경 구축측면에서 어려움이 있다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
**** 한국철도기술연구원 수석연구원, 정회원

본 연구는 이러한 어려움을 해결하고 현 차 운행 이전 단계에서 적용기술의 충분한 성능과 기능을 모의시험 할 수 있는 가상의 열차운행환경을 지원하는 시뮬레이터를 구현하였다. 이 시뮬레이터는 차량내 각 주요장치인 출입문, 추진제어장치, 제동장치, 보조전원장치, 고전압장치 등의 주요기능을 소프트웨어로 가상 처리하여 관련 모의 시험대상 장치에 필요한 입·출력신호 또는 통신데이터를 제공하며 각종 운행 또는 고장시나리오에 따른 모의시험 할 수 있도록 고안되었다. 본 논문에서는 구현된 시뮬레이터를 소개와 이를 이용한 역간 열차의 자동운전제어 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

2. 열차 자동운전제어 시스템

열차 자동운전제어 시스템은 TCMS, ATC, ATO, TWC과 같은 차상제어시스템으로 구성되어지며 이들의 부속장치인 TRA(Trigger Receiver Assy), ADU(Aspect Display Unit), ATC안테나, TWC안테나 등을 포함하여 모든 차상의 주변기기와 관련하여 차량의 운전제어에 대한 기능을 수행한다. 그림 1은 국내 운영노선인 서울시 2기 열차자동운전제어 시스템의 각 장치간의 인터페이스 흐름도를 나타낸 것으로 시스템 설계사양의 특징에 따라 노선별로 약간의 차이가 있다[5,6]. TCMS는 전동차의 운행상태 및 각 장치의 수행기능을 감시함으로써 운전자에게 운행에 필요한 정보를 제공하고 주변기기를 제어 및 감시하는 기능을 수행한다. 양쪽 운전실에 설치되어 차량시스템 전반에 걸친 제어를 담당하는 편성제어컴퓨터와 각 차량단위에 설치되어 차량종류별 관련 주변기기의 감시와 제어를 실행하는 차량제어컴퓨터, 운전자를 위한 모니터링 장치로 구성된다. ATC는 지상 웨이사이드 신호장치로 부터 속도지령을 받아 유효한 속도제한을 수행하며 과속상태를 검지하여 상용 전제동 또는 비상제동을 작용한다. ATC는 운전실의 다른 주요 기기와 통신하며 과속방지 뿐만 아니라 운전모드 변환, 출입문 열림감시 및 속도코드의 감시 등을 수행한다.

ATO는 ATC로부터 속도지령을 받아 역과 역 사이, 역과 회차 지점 사이에서 자동으로 열차를 작동시키는 장치로서 TCMS로 제동 및 추진지령을 송신하며 이로부터 작동 및 정지명령을 받는다. TWC는 차상에서 지상 웨이사이드로의 통신과 지상통신연계를 제공하는 차상장치로서 TTC와의 통신링크를 제공하며 이 정보를 ATC, ATO, TCMS에 분배하는 기능을 한다.

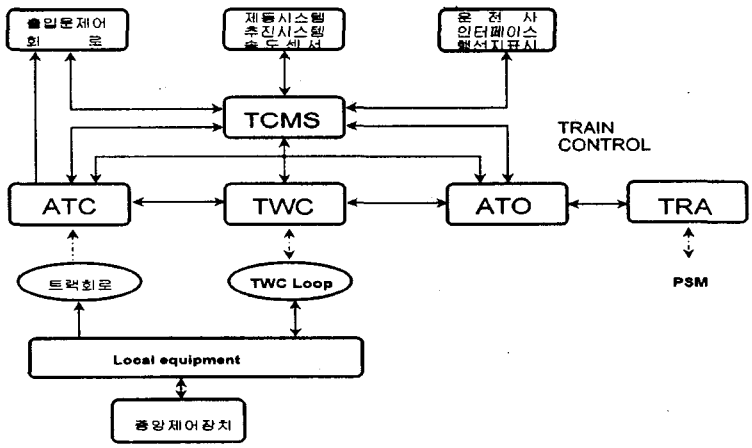

그림 1. 열차 자동운전제어시스템의 인터페이스 흐름도

3. 시뮬레이터 기능 및 구성

3.1 개요

열차 자동운전제어를 위한 시뮬레이터는 기본적으로 8량 1편성의 도시철도차량을 모의시험 할 수 있도록 고안되었으며 크게 운영부와 시뮬레이터 입·출력부로 구성하였다. 시스템의 다양한 기능을 모의하기 위하여 관련되는 각종 장치의 기능을 가상으로 구현하고 이들의 신호를 모의로 발생시켜 시험대상장치와 디지털/아날로그 입·출력신호 또는 통신으로 연계동작 하도록 하였다.

그림 2는 시뮬레이터의 전체 구성을 표현한 것으로 운영부는 사용자 인터페이스부분과 모의시험을 위한 시나리오 작성 및 환경 구축, 열차자동제어 시뮬레이션 결과 분석화면으로 구성된다. 또한 열차시뮬레이터 입·출력부는 전체적으로 5개의 캐비넷으로 구성하여 첫 번째와 다섯째 캐비넷에는 각각 선두차량과 후부차량에 해당하는 역할을 하며 두 번째와 네 번째 차량은 각각 한 쌍으로 M1, M2차량을, 세 번째 캐비넷은 T1, T2 차량에 해당하는 시뮬레이터 입·출력 부분으로 구현하였다. 운영부와 시뮬레이터 입·출력 부분간의 연결은 Ethernet 통신을 통해 필요한 각종 정보를 송·수신한다.

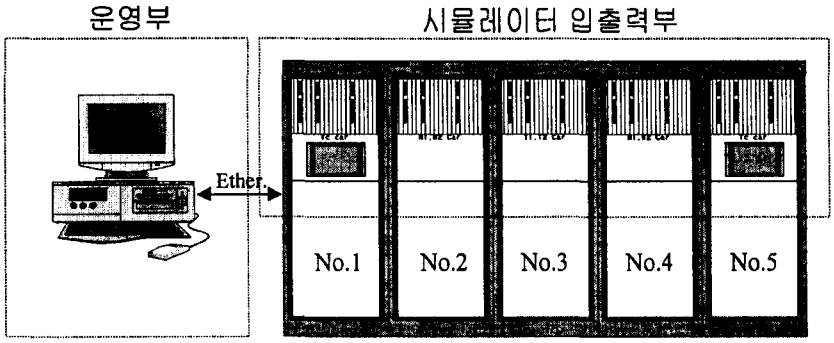

그림 2 시뮬레이터 구성

3.2 운영부

사용자 인터페이스와 자동운전시험을 주 기능으로 하는 운영부는 공장 자동화 소프트웨어 툴을 이용하여 구현하였다. 이 소프트웨어는 주로 자동화 분야의 제어와 감시에 사용되는 운영 기술자 수준의 툴 패키지로서 제어와 감시의 대상을 포인트로 정의하여 사용한다. 사용자는 운영부를 이용하여 각 시스템에 정의된 포인트들을 대상으로 경향을 분석하고 이상 상황을 판정 및 조치하며 그 이력을 관리할 수 있다. 운영부는 사용자인터페이스를 통해 시뮬레이션 하고자 하는 포인트들과 제어 값들을 정의할 수 있으며 그 값을 시뮬레이터 입·출력부에 송수신하는 일을 수행한다. 또한 현재의 모의상황을 시뮬레이터를 통해 감시할 수 있어 상위 컴퓨터 환경에서 시험장치를 감시할 수 있다.

운영부는 일반적인 PC상에서 구현되었으며 시뮬레이터 입·출력부분과 통신하기 위한 Ethernet 통신포트를 가지고 있다. 또한 사용자의 편리성을 고려하여 GUI(Graphic User Interface)방식을 사용하였다. 사용자는 이러한 인터페이스를 통하여 실제 시뮬레이터 입출력부분에 구성되어 있는 각 모의장치의 정보를 변경하고, 또한 각 모의장치의 상태 및 동작상황을 확인할 수 있다.

그림 3은 시뮬레이터의 운영부의 실제 화면에 대한 모습을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 그림의 좌측은 제어 및 감시포인트의 설정과 운영화면의 구성을 보여주며, 실제 운전대장치를 대신 할 수 있는 제어 패널을 동적 화면으로 구현할 수 있다. 우측은 각종 시험을 위한 시나리

오 작성 편집기의 화면을 나타낸 것이다. 이와 같이 최대한 사용자의 편리성과 유연성을 제공할 수 있도록 구성하였다.

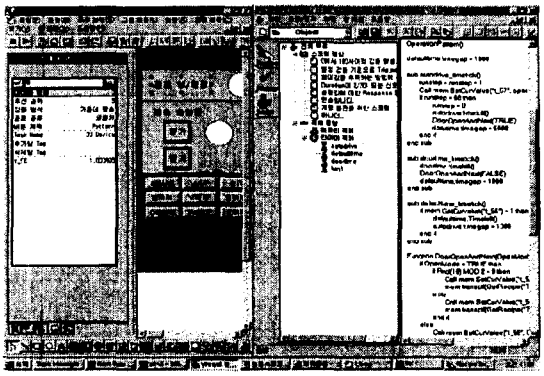

그림 3. 시뮬레이터의 운영부 화면

3.3 시뮬레이터 입·출력부

시뮬레이터 입·출력부는 모의시험 대상 시스템에 실제 부착될 각 주변 기기들을 대신해 그 정보를 입·출력하는 역할을 하며 이를 위한 하드웨어와 소프트웨어가 설치되어 있다. 하드웨어는 CPU보드, Ethernet 인터페이스 모듈, 통신보드, 디지탈 입·출력, 아날로그 출력보드 등으로 구성되어 있다. 이들 하드웨어 위에 제어 실행부에 해당하는 시스템 소프트웨어가 있으며 이 시스템 소프트웨어에서 제공되는 멀티태스킹기능을 바탕으로 Ethernet TCP/IP통신에 관한 소켓 커널과 시리얼 인터페이스에 관한 통신 인터페이스 소프트웨어가 들어있다[7]. 또한 응용소프트웨어가 시스템 소프트웨어 위에 올라가게 되는데 주로 통신채널을 통해 정보를 송수신하는 각종 주변기기들의 가상 기능을 구현한다. 그림 4는 이러한 시뮬레이터 입·출력부에 대한 하드웨어와 소프트웨어의 내부 모듈 구성을 나타낸 것이다.

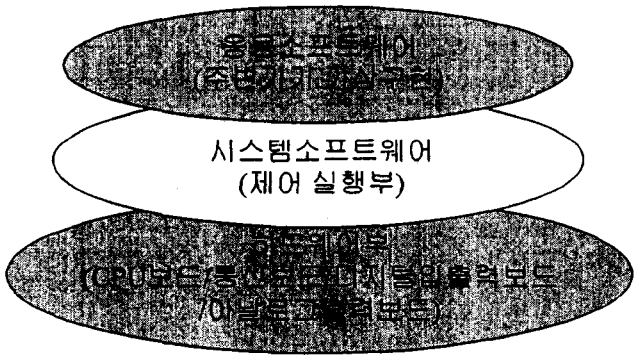

그림 4 시뮬레이터 입·출력부의 내부모듈 구성

실제 차량의 각종 차상 주변 장치들의 기능을 모의로 실현하고 이를 시험대상 시스템에서 인식할 수 있도록 처리하는 작업은 시뮬레이터의 통신모듈에서 대부분 수행된다.

표 1은 시뮬레이터 입·출력부의 통신 모듈에서 처리하는 구성별 관련 차상 주변장치를 나타내었다.

표 1. 시뮬레이터 입·출력부의 구성 및 관련 주변기기

구분	차량형식	주변 장치 종류(개수)
캐비넷 #1	선두차	ATC(1), TWC(1), PA(1), ATO(1), PIS(1)
		ECU(1), SIV(1)
캐비넷 #2	M1	VVVF(1), ECU(1)
	M2	VVVF(1), ECU(1), CMINV(1)
캐비넷 #3	T1	ECU(1)
	T2	ECU(1)
캐비넷 #4	M1	VVVF(1), ECU(1)
	M2	VVVF(1), ECU(1), CMINV(1)
캐비넷 #5	후부차	ECU(1), SIV(1)
		ATC(1), TWC(1), PA(1), ATO(1), PIS(1)

그림 5는 실제 구현된 시뮬레이터의 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 우측하단의 모형차량은 실제 크기의 1/10로 축소하여 제작한 선두차량 형식으로 이를 대상으로 직접적인 제어시험을 할 수 있다.

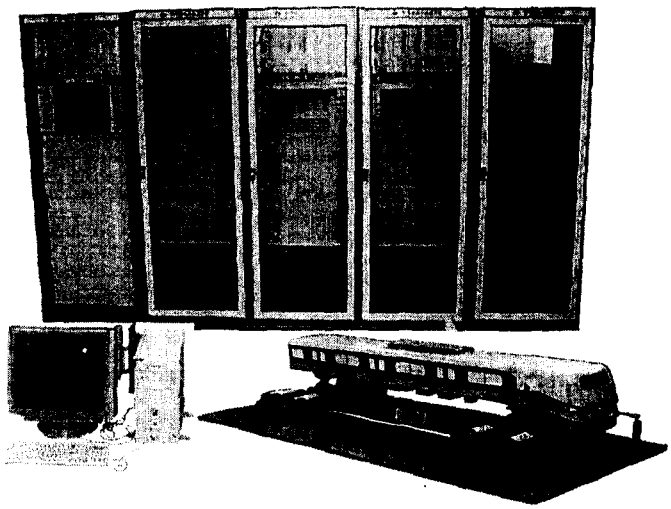

그림 5 실제 구현된 시뮬레이터 모습

4. 역간 자동운전제어 시뮬레이션

열차의 역간 자동운전제어에 관한 시뮬레이션은 역과 역 사이에서 지정된 열차운전 패턴에 따라 출발과 가속, 감속운행, 역 정차 등 실제 열차가 운전하는 상황을 구현하여 자동운전제어와 관련된 시스템의 성능과 제어기술을 모의 시험한다. 자동운전제어를 위한 조건은 주간제어기가 타행위치, 역전기는 전진, ATC/ATO 운전모드스위치는 자동모드로 유효한 상태이며, ATO가 TWC 루프로부터 데이터를 수신하고 준비상태가 양호함을 만족해야 한다. 이때 ATO가 TWC를 통하여 수신할 데이터는 다음 역과 현재 역코드, 운행제어(평상/회복모드), 고정속도, TWC반송과 감지신호이다.

운전조건을 만족하면 출발허가 지시램프가 점등되며 운전자의 출발버튼 누름과 동시에 자동운전이 진행된다. 이때 ATC는 모든 출입문이 닫힘과 자동운전모드정보와 유효신호를 TCMS에 알리고 출발버튼신호가 인가되면 제한속도를 ATO와 ADU로 전송한다. ATO는 ATC로부터의 속도

명령을 토대로 가속제어를 시작하여 열차를 출발시키며 가·감속제어, 정속도제어, 정밀정지제어를 수행하여 TCMS에 역행 및 제동지령을 보낸다. TCMS는 추진제어장치 및 제동장치의 상태를 감시하며 ATO로부터 받은 가·감속명령을 이들 장치에 보낸다. 또한 가선전압/전류, 열차속도, 출입문상태 등을 감시하며 ATO에 이용 가능한 역행 및 제동력, 열차속도 등을 보낸다.

그림 6은 시뮬레이션을 위한 열차 자동운전제어패턴 구성 예를 나타낸 것이다. 제한속도는 80[km]→ 60[km]→80[km]→50[km]순으로 변화되며 이를 기준으로 자동운전을 수행한다.

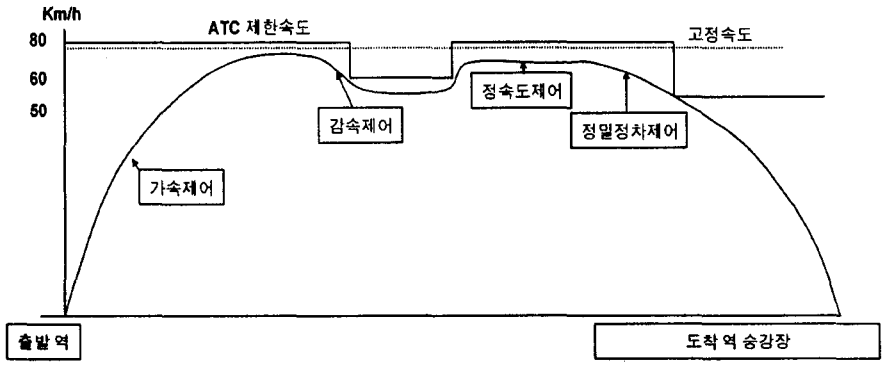

그림 6 시뮬레이션을 위한 열차 자동운전제어패턴 예

시뮬레이션은 제어시스템에 필요한 모든 출력신호 및 제어신호를 시뮬레이터로부터 제공받아 적절한 열차의 상태를 시뮬레이션하며, 추진 및 제동신호를 바탕으로 열차의 제한속도패턴에 따라 진행되는 열차속도를 비교 추적할 수 있도록 하였다. 정상적인 열차운행 패턴의 시뮬레이션뿐만 아니라 사용자의 고장시나리오에 따른 각 시스템의 기능을 시험 할 수 있도록 하였으며 고장종류로는 주변장치와의 통신사고, 추진제어장치, 제동장치의 고장 등 주변장치의 고장과 열차운행상태를 모의할 수 있게 하였다. 본 논문에서는 지정된 운행패턴에 대한 열차운전제어를 모의하고 이로 인한 열차의 속도변화를 시뮬레이션 하였다. 그림 7은 시뮬레이션 결과 예를 운영부 PC 화면상에서 보인 것으로 상단은 그래픽 사용자 인터페이스로 구현된 열차 운전대 제어패널을 동적으로 구현한 것이며 하단은 거리에 대한 속도의 변화와 시간을 열차가 역간 자동운전제어를 진행하는 동안에도 계속해서 운행패턴을 추적 할 수 있는 결과화면을 나타낸 것이다. 이 시뮬레이션 결과들을 분석하여 역간 최적의 운전제어 속도패턴을 추정할 수 있다.

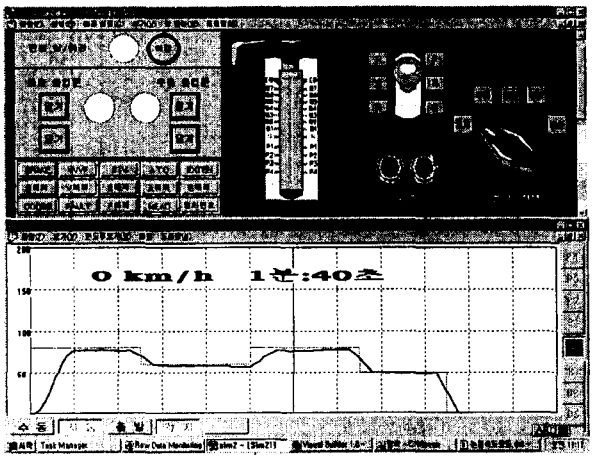

그림 7 시뮬레이션 결과 화면

5. 결 론

본 연구는 열차자동운전제어에 관한 모의시험용 시뮬레이터 개발과 이를 이용한 자동운전시험에 관하여 나타내었다. 열차운전제어에 관련한 차상제어장치인 TCMS, ATC, ATO, TWC시스템과 지상신호설비의 인터페이스 운행환경을 가상으로 제공함으로써 열차의 자동운전 성능을 모의시험하였다. 이 시뮬레이터는 실제 차량에 적용되어 시험을 실시하기 이전단계에서 제어시스템의 성능 및 신뢰성을 충분히 시험, 검증할 수 있도록 고안되었다. 본 논문은 여러가지 시뮬레이터 기능 중 정상적인 역간 자동운전제어기능에 대한 시뮬레이션 결과만을 보였으며 지정된 운전제어패턴과 시뮬레이션 결과를 서로 비교함으로써 시뮬레이터의 성능을 입증하였다. 현재 연구개발 진행중에 있는 TCMS, ATO 시스템 개발과 관련하여 실제 운행환경에 가깝게 보다 상세한 차량 주변기기의 기능구현과 환경을 보완할 계획이다.

참고문헌

1. Tadshi Takaoka(1994), "Automatic Train Operation and Protection Systems for High-Speed High-Density Traffic Operation", Hitachi Review Vol. 43. No.6, 1994 pp.251~256
2. P.Howlett(1996), "Optimal Strategies for the Control of a Train", Volume 32, Number 4 pp.519~532.
3. 서울특별시지하철건설본부, 서울특별시도시철도공사(1996), "서울특별시 지하철 7,8호선(226량) 전차정비지침서" 제5권, 제6권, 제7권
4. 서울특별시지하철건설본부, 서울특별시도시철도공사(1995), "서울특별시 지하철 5호선(366량) 전차정비지침서", 제5권, 제7권
5. 한국철도기술연구원, 건설교통부(1997), "'97 도시철도차량 표준화 국산화 연구개발보고서(종합제어장치)" 4장, pp4-1~4-109
6. 배민호, 장중덕(1997), "서울지하철 5호선 무인운전SYSTEM(Ⅰ)", 철도차량기술, 통권 제89호 pp.31~46.
7. WindRiver(1997), "VxWorks Reference Manual 5.3.1", Edition 1