도시철도 운전형태별 시스템 구비요건 분석 연구

Analysis of the system requirements by EMU operating types

홍용기† 정종덕* 편장식**

Hong, Yong-Ki Chung, Jong-Duk Pyun, Jang-Sik

ABSTRACT

When the electric motor car was first introduced, an engineer, responsible for the work related to operation and a conductor for the announcement and management of entrances and the other services like as monitoring the passengers in the platforms used to take together the train for passengers' safe. As new technologies developed and the urban transit system had the automatic driving facilities, automatic door switch and broadcasting systems, to solve the financial problems, most subway systems introduced the one-man operation system. To curtail the operating expense through automatic control and operation for the economical efficiency, the crewless driving system was introduced abroad around 1970 on the light weight train and Japan started the crewless driving system in 2005, Germany started it in June 2008. We examine system requirements of the system and methods to construct safe systems that would be introduced, suitable for one-man operation system or crewless driving system through the surveys and analysis of driving state and the systems.

1. 서 론

전동차 도입 당시는 안전운행을 위하여 기관사와 차장 2인이 탑승하여 기관사는 열차 운행과 직접 관련된 업무을 담당하고 차장은 안내 방송, 출입문 취급, 승강장에서의 승객의 동향 감시 등의 서비스 업무를 담당하며 운행을 하였고, 발전된 기술 도입으로 도시철도차량이 자동운전설비, 자동출입문 취급, 자동안내방송 등의 설비를 갖추게 되면서 경제적 측면에서 운영적자를 해소하기 위하여 경영합리화의 일환으로 1인 운전를 도입하게 되었다.

운영기관의 경제성을 확보하기 위해서는 자동제어, 자동운행 등을 통한 무인자동운전의 도입으로 도시철도시스템 운영비를 대폭적으로 감축시키는 것이 요구되고 있어, 외국의 경우 1970년경부터 경량전철을 중심으로 무인운전으로 운행되고 있으며 일본은 2005년, 독일은 2008년 6월부터 지하철에도 무인운전으로 운행하고 있다.

이에 도시철도차량에 대한 운전현황, 시스템 조사 및 분석을 통하여 향후 도입해야 할 1인 운전 및 무인운전의 운전형태에 따라 갖추어야 할 시스템 구비요건에 대한 검토 및 분석을 통해 안전시스템 구축방안을 제시하고자 한다.

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단, 수석연구원
E-mail : ykhong@krri.re.kr
TEL : (031)460-5501 FAX : (031)460-5749
* 정회원, 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단, 책임연구원
** 비회원, 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단, 연구원

2. 운전형태 현황

2.1 국내 도시철도 운전형태

국내 도시철도는 현재 서울, 부산, 대구 등 주요 도시에서 운행하고 있으며 대도시의 교통난 해소에 큰 기여를 하고 있다. 또한 지자체를 중심으로 경전철을 비롯한 다수의 도시철도 시스템의 도입이 검토되어 건설 중이거나 도입 검토 중에 있다.

초기에 전동차를 도입할 당시에는 안전운행을 위해 기관사와 차장 2인인 탑승하여 기관사는 열차 운행과 직접 관련된 업무를 담당하고 차장은 안내 방송, 출입문 취급, 승강장에서의 승객의 동향 감시 등의 서비스 업무를 담당하며 운행을 하였다. 그러나 도시철도차량은 기술적 발달과 함께 자동운전설비, 자동출입문 취급, 자동안내방송 등 새로운 시스템 설비의 도입으로 운전형태가 2인 운전에서 1인으로 발전되었다. 현재 서울메트로가 담당하고 있는 서울지하철 1~4호선과 한국철도공사가 담당하고 있는 수도권 전철(분당선 제외)을 제외한 대부분의 국내 도시철도는 1인 운전을 실시하고 있다. 도표 1은 국내 도시철도의 운전형태를 나타낸 것이다.

도표 1. 국내 도시철도 운전형태 현황

구 분	열차(노선)	열차 편성당 조성 차량수	1일평균 승객수 (천명)	부기관사(차장) 동승여부
한국철도공사	국철선	10량	2,219	2인 운전
	분당선	6량		1인 운전
서울메트로	1~4호선	10량(신설동지선제외)	3,920	2인 운전
서울도시철도공사	5~7호선	8량	1,622	1인 운전
	8호선	6량		
인천지하철공사	1호선	6량	196	1인 운전
대전도시철도공사	1호선	4량	64	1인 운전
대구지하철공사	1~2호선	6량	297	1인 운전
광주도시철도공사	1호선	4량	30	1인 운전
부산교통공사	1호선/2호선/3호선	8량/6량/4량	641	1인 운전

2.2 국외 도시철도 운전형태

국외의 경우 1970년경부터 경량전철 시스템을 중심으로 완전자동화 무인운전 프로젝트가 추진되었으며, 약 53개국 380여개 노선에서 AGT(철도차륜, 고무차륜), 선형 유도 모터, 자기부상 등의 경전철을 중심으로 무인운전이 운행되고 있다. 도표 2는 국외 주요도시의 도시철도 운전형태를 나타낸 것이다.

도표 2. 국외 주요도시의 도시철도 운전형태

국가	도시	운영기관	차종	운전	신호/안전	개통일	공급전압
Japan	Tokyo	동경지하철주식회사	Metro	D/C & D	ATC	1927.12	600/1500VDC
		동경도교통국	Metro	D/C & D	ATS/ATC	1960.12	1500VDC
	Fukuoka	후쿠오카교통국	Metro	D	ATC/ATC	1981.07	1500VDC
	Sendai	센다이교통국	Metro	D	ATC	1987.07	1500VDC
United Kindom	London	London Underground Limited (LUL)	Metro	D	ATC/ATO	1863.01	630VDC
	Newcastle	Tyne & Wear Passenger Transport Executive (Nexus)	Metro	D	ATS	1980.08	1500VDC
	Liverpool	Merseyrail	LRT	D/C	ATC	1886.00	750VDC
France	Paris	Régie Autonome des Transports Parisiens (PATP)	Metro	D&L	ATC/ATO	1900.07	750VDC
	Rennes	Service de Transports de L'Agglomération Rennaise (STAR)	VAL	L	CTC/ATO	2002.30	750VDC
	Roune	Transports en Commun de L'Agglomération Rennaise (TCAR)	LRT	D	…	1994.12	750VDC
Germany	Berlin	Berliner Verkehrsbetiebe GmbH (BVG)	Metro	D	PTC/ATO	1902.08	750VDC
	Frankfurt	Verkehrsgesellschaft Frankfurtam Main (VGF)	Metro/ LRT	D	autoblock	1968.10	600VDC
	Stuttgart	Stuttgarter Strassenbahnen AG (SSB)	LRT	D	autoblock	1966.00	750VDC
	Düsseldorf	Rheinische Bahngeselleschaft AG (Rheinbahn)	LRT	D	ATC/ATO/ ATS	1981.10	750VDC
United States	New York	MTA New York City Transit (NYCTA)	Metro	D/C	ATS	1904.10	625VDC
	Newark	The Port Authority Trans-Hudson Corporation (PATH)	Metro/ LRT	D/C	CTC	1908.02	650VDC
	Washington D.C	Washington Metropolitan Area Transit Authority (WMATA)	Metro	D	ATO/ATP/ ATC/ATS	1976.03	750VDC
	Buffalo	Niagara Frontier Transit SystemInc., (NFT Metro)	LRT	D	ATC	1985.00	650VDC

※ **범례** ☞ 차종; Metro ⇒ 지하철, LRT ⇒ 경전철, 숭무 ; D ⇒ 기관사, C ⇒ 차장, L ⇒ 무인(자동)운전

3. 시스템 구비요건 분석

3.1 자동화등급에 따른 열차운행 기본기능의 분담(IEC 62290-1)

도시철도차량(UGT: Urban Guided Trasport)는 다음에 정의되는 다양한 자동화 등급 하에서 운행 될 수 있다. 자동화 등급의 분류는 열차운영에 필요한 기본적인 기능들을 차량 운영 직원과 시스템 간에 책임을 분담하는 형태에 따라 정의되며, 선로나 네트워크상에서 주어진 자동화 등급에서 차량 운영시 필수기본기능이 정의되어 있다. 해당 자동화 등급에서 차량 운영시 필수기본기능이 아니라도 시스템에 의해 구현될 수 있으며, 자동화의 등급은 운행요건, 운전설비, 차량, 운영요원 등에 영향을 미치며, 승객들의 행동도 고려하여야 한다. 자동화의 등급은 도표 3에 나타나 있듯이 5개의 등급으로 나뉘며, 열차운행의 기본기능을 자동화 등급별로 나타낸 것이다.

(1) 자동화 등급0(GOA0) On-sight 열차운전

본 등급의 자동화 단계에서는 기관사가 모든 책임을 지며 기관사의 행위를 감시하기 위한 시스템이 불필요하다. 그러나 전철기 및 단선선로는 부분적으로 시스템에 의해 감시될 수 있다.

(2) 자동화 등급1(GOA1) 수동(Non-Automated) 열차운전

본 등급의 자동화 단계에서는 기관사는 열차의 전두부 운전실에서 선로를 주시하며 위험 상황이 발생하는 경우 열차를 정지시킨다. 지상신호나 운전실 신호에 따라 기관사가 가·

감속 지시를 하며, 시스템은 기관사의 행위를 감시한다. 이러한 감시는 특정위치에서 신호와 속도에 관하여 명확하게 연속 또는 간헐적으로 이루어진다. 출입문 닫힘을 포함하여 역에서 열차의 안전한 출발은 열차운영요원의 책임이다.

(3) 자동화 등급2(GOA2) 반자동(Semi-Automated) 열차 운전

본 등급의 자동화 단계에서는 기관사는 열차의 전두부 운전실에서 선로를 주시하고 위험상황이 발생하는 경우 열차를 정지시킨다. 가・감속은 자동적으로 수행되며 속도는 시스템이 연속적으로 감시 한다. 역에서 열차의 안전한 출발은 열차운영요원의 책임이다. (출입문의 개폐는 자동적으로 수행될 수 있다.)

(4) 자동화 등급3(GOA3) 무인 열차운전

본 등급의 자동화 단계에서는 열차의 전두부 운전실에서 선로를 주시하고 비상상황에서 열차를 정지시킬 수 있는 기관사가 없기 때문에 GOA2등급과 비교하여 추가적인 대책이 필요하다. 본 단계에서는, 많은 운영요원의 탑승이 필요할 수 있다. 출입문의 닫힘을 포함한 역으로 부터의 열차의 안전한 출발은 운영요원의 책임이 될 수 있거나 자동으로 수행될 수 있다.

(5) 자동화 등급4(GOA4) 완전무인 열차운전

본 등급의 자동화 단계에서는 열차 내 탑승한 운영요원이 아무도 없기 때문에 GOA3과 비교하여 추가적인 대책이 필요하다. 출입문의 닫힘을 포함한 역으로 부터의 열차의 안전한 출발이 자동으로 수행되어야 한다. 특별히 시스템은 승객의 탈출과 같은 위험 상황이나 비상조건의 감지 및 관리를 지원한다. 탈선이나 화재/연기의 감지 등과 같은 위험상황이나 비상조건의 경우에는 운영요원의 개입을 필요로 할 수도 있다.

도표 3. 자동화등급별 열차운행의 기본기능

열차운행의 기본기능		On-Sight 열차운전	수동 열차운전	반자동 열차운전	무인 열차운전	완전무인 열차운전
		GOA 0	GOA 1	GOA 2	GOA 3	GOA 4
열차 이동의 안전 확보	안전한 진로확보	O	시스템	시스템	시스템	시스템
	열차의 안전분리 확보	O	시스템	시스템	시스템	시스템
	안전속도 확보	O	O	시스템	시스템	시스템
열차 운전	가・감속제어	O	O	시스템	시스템	시스템
선로의 감시	장애물과의 충돌방지	O	O	O	시스템	시스템
	선로상의 사람과 충돌 방지	O	O	O	시스템	시스템
승객 이동 감시	승객 출입문 제어	O	O	O	O	시스템
	차량간 또는 열차와 승강장 사이에 있는 승객의 손상 방지	O	O	O	O	시스템
	안전한 출발 조건 확보	O	O	O	O	시스템
열차 운행	운행시작/중지	O	O	O	O	시스템
	열차의 상태 감시	O	O	O	O	시스템
비상상황의 감시 및 관리확보	열차고장진단 수행 -화재와 연기 감지, -열차탈선 감지, -열차고장 감지, -비상상황조치 (호출/탈출, 감시)	O	O	O	O	시스템 또는 종합관제실
O : 운영요원의 책임						

3.2 1인 운전/무인운전 연구사례

운전형태별 연구사례 중 일본의 Hitachi사의 1인운전 및 무인운전에 대한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 1인 운전 지원시스템의 요구사항 및 주요 필요설비

1인 운전을 위한 지원시스템의 요구사항을 요약해보면, ATO/차량정보제어시스템과 같은 직원 지원시스템은 기관사의 주된 업무인 열차 운행을 지원하는데 사용되며, 승강장 감시 시스템(platform monitoring system), 제어국 모니터(control station monitors)에서의 ITV video viewing, 차내의 모니터는 승객들의 승강장 안전을 책임진다. 승객이 승강장에서 떨어지는 것을 방지하는 승강장 출입문 시스템(platform gate system), 승강장의 곡선 부분에 존재하는 틈 사이로 빠지거나 물건을 떨어뜨리는 것을 막도록 도와주는 gab filler(수평으로 이동하는 발판) 등을 설치한다.

도표 4. 자동화등급별 열차운행의 기본기능

운전		시스템	기능
기동 점검		ATI	고장감지 등
운전		ATO, TASC	고장감지 등 자동 운전 제어
안전 모니터링	승강장 접근	ITV → 승강장 문	승객 안전 점검 → 확보
	승·하차 상태 문 점검	ITV	승객 안전 점검
	승강장 출발	ITV → 승강장 문	승객 안전 점검 → 확보
방송		방송장치	승객 안전 점검
차내 승객 서비스		차내 방송장치/차내 표시기 차내 온도 제어	차내 정보 제공
비상조치		deadman switch(자동 운전정지) →열차 무선을 통해 중앙제어실에 보고	응급조치

ATI: autonomous decentralized train integrated system
ATO: automatic train operation
TASC : train automatic stop position control
ITV: industrial television

(2) 무인운전 지원시스템의 요구사항 및 주요 필요설비

도표 5는 무인운전 지원시스템의 요구사항 및 주요 필요설비를 나타낸 것이다.

도표 5. 무인운전 지원시스템의 요구사항 및 주요 필요설비

고려사항	필요설비
1) 안전하고 부드러운 열차운전 제어 보장	ATC/ATO 열차운전 제어장치
2) 열차 출발 및 도착시 및 승객 승하차 시 승객의 안전보장	ITV 플랫폼 감시 장치와 Platform Screen Door
3) 차내의 승객에 대한 안전보장	· 차내 상황 감지모니터 · 비상 누름버튼 · 중앙통제실로 정보를 신속하게 전송 할 수 있는 정보 전달체계 · 중앙통제실에서 차량 원격제어장치
4) 비상 사태시 승객의 안전보장	지상과 차상간의 원활한 정보 전달체계 구축 (데이터, Voice, Video 등의 양방향 전달체계 구축)

가) 무인운전을 위한 시스템 구성과 기능

주행 중인 차량을 역 사이에 정지시키지 않을 수단과 정지했을 경우라 해도 다음 역까지 주행이 가능한 수단을 강구하며, 차량주행에 직접적으로 관여하는 장치는 이중계나 2유닛으로 구성 하고 1계 혹은 1유닛이 정지해도 기능은 유지할 수 있도록 구성한다. 가선 정전에 따른 역 사이 정차 등으로 보조전원장치가 멈췄을 경우 주요 기기는 '운전기능', '운수사령과의 연락기능', '승객에 불안감을 주지 않는 기능'을 유지할 수 있도록 한다. 지상 측 보안장치의 주요부분은 다중계로 하고 시스템 전체로는 페일 세이프 기기를 채택한다. 차량에 이상이 발생했을 경우 신속히 대피, 유도 등의 대처를 취 할 수 있도록 체제를 정비한다. 도표 6은 무인운전을 위한 주요 장치의 시스템구성 및 기능을 나타낸 것이다.

도표 6. 무인운전을 위한 주요 장치의 시스템구성 및 기능

장치명	시스템구성과 기능
운행관리시스템	· 주요기기 : 이중계구성 · 차량 출입문 폐(閉)(출발)지령기능 · 운전대전환지령기능 · 역통과 지령기능 · 강제 출입문 개(開)지령기능 · 임속 15Km/h 해제지령기능 · 재 역행 지령기능 · 임속 15Km/h 지령기능 · 관통문 잠금 해제지령기능 · 비상제동 경보와 완해지령기능 · 강제정차지령기능 · 이상 시 차내 안내지령기능 · 냉난방장치 운전지령기능 · 차량고장상태감시기능
승강대 출입문	· 차량문과 연동한 승강대 출입문개폐기능 · 이상검지 · 자동개폐기능
ATC장치	· 수신부 · 제어부 모두 이중계 구성 · 축전지 백업
ATO장치	· 송수신부 · 제어부 모두 이중계 구성 · 축전지 백업 · 지점검지 실패 시의 백업주행기능 · 역통과 기능 · 자동전방 인칭기능 · 재역행기능 · ATO지상자가 출발지령을 내리는 자동출발기능 · 역간정차상태 · 정지위치정보를 운전사령에 통보 · 임속 운전기능(주회로 제어장치 고장, 지진발생시)
ATI장치	· 기간전송로 : 이중계 · 축전지 백업
열차무선장치 (통화 · 비상계)	· 기간전송로 : 이중계 · 축전지 백업 · 발보신호출력기능 · 비상통보장치 통화기능 · 발보신호수신으로 비상제동지령 출력 · 차량고장상태 통보(데이터계 백업)
열차무선장치 (데이터계)	· 주요기기: 이중계구성 · 축전지 백업 · 발보신호출력기능(비상계 백업) · 운전지령에서 원격지령을 출력하는 기능(재역행 지령기능, 임속 15km/h 지령기능, 관통문 잠금 해제지령 기능 외) · 차량고장상태 통보
차량출입문 제어장치	· 승강장 출입문과 연동된 차량 출입문개폐기능 · 문끼임검지 · 자동재개폐기능 · 자동운전 중의 측문 · 관통문 개(開)검지기능
기타	· 운전대 자동전환회로 · 지장물검지장치 · 이상진동검지장치 · 차내방송 · 표시장치(이상시 차내안내기능, 잔류객 하차 촉진안내기능) · 주회로 제어장치(자동고장리셋 · 유니트 개방 기능)

4. 운전형태별 안전시스템 구축방안

4.1 1인 운전

1인 운전은 예전에 차장이 수행하던 일을 포함하여 1인 기관사가 수행하여야 한다. 그러므로 운전상의 어려움을 피하고 안전 운전을 위해 ATO에 의한 자동운전이 가능하여야 하며, 차량의 고장 및 상태 정보가 기관사의 운전대에 표시되어야 한다. 승객들이 승차, 하차시의 안전을 보장하기 위해 승강장 감시시스템이 설치되어야 하며, 1인 운전에서는 차내 방송, 차내표시기가 객실에 설치되어 상황정보가 제공되어야 한다. 비상 통화 시스템이 객실에 설치되어 승객들이 기관사나 중앙 제어실에 직접 연락할 수 있어야 한다.

4.2 무인 운전

무인운전에서는 열차 내에는 승무원이 탑승하지 않기 때문에 1인 운전과 비교하여 추가적인 안전 대책이 필요하다. 차량주행에 직접적으로 관여하는 장치는 이중계나 2유닛으로 구성하고, 1시스템 혹은 1유닛이 정지해도 기능은 유지할 수 있도록 시스템 전체로는 폐일세이프 기기를 채택하여야 한다. 열차의 전두부 운전실에서 주행 선로를 주시하고 비상상황에서 열차를 정지시킬 수 있는 기관사가 없기 때문에 지장물 검지장치, 이상 진동검지장치 등이 필요하며, 강제 정차기능과 정지했을 경우 재 역행 할 수 있는 기능, 다음 역까지 주행이 가능한 역통과 기능, 회차역에서 자동회차 기능 등이 있어야 한다. 또한, 승객의 안전한 승하차를 포함하여 역으로 부터의 열차의 안전한 출발이 가능하도록 스크린도어 및 역사용 카메라 등의 승강장 감시시스템이 필요하다. 차량에 이상이 발생했을 경우 감시하며 신속히 대피, 유도 등의 대처를 취 할 수 있도록 객실 카메라 및 중앙제어실에서 차량 원격제어 시스템 체제를 확보하여야 한다. 특별히, 승객의 탈출, 차량의 탈선이나 화재/연기의 감지 등과 같은 위험 상황이나 비상조건의 경우 감시 및 관리를 지원하도록 필요시 안전요원을 탑승 시킬 수 있어야 한다.

도표 7. 운전 형태별 안전 시스템

구분	시스템
1인 운전	• ATO에 의한 자동운전
	• 승강장 감시시스템 - 역사용 후사경 - 역사용 카메라 및 차량용 모니터 - 역사용 카메라 및 모니터
	• 승강장의 적합한 조도 유지
	• 차내 자동 방송장치, 표시기
	• 승객과 사령실간의 통화시스템
무인운전	• 운행관리 시스템 - 주요기기 : 이중계구성 - 자동출발제어기 - 역통과 지령기능 - 임속 15Km/h 지령기능 - 비상제동 경보와 완해지령기능 - 이상 시 차내 안내지령기능 - 차량고장상태감시기능 - 차량 출입문 개폐제어, - 운전대 전환지령기능 - 재 역행 지령기능 - 관통문 잠금 해제지령기능 - 강제정차지령기능 - 냉난방장치 운전지령기능
	• 지장물 검지장치, 이상 진동검지 장치
	• 객실카메라, 역사용 카메라
	• 승객과 중앙제어실 간에 쌍방향 통신 구축
	• 스크린 도어
	• 중앙제어실에서 차량 원격제어 시스템 구축
	• 승강장 감시시스템
	• 필요시 안전요원 탑승

5. 결론

국내외 도시철도차량의 운전환경이 변화되고 있으므로 운전형태별 안전성 향상 시스템을 구성할 경우 도시철도 차량을 기준으로 전력공급, 신호, 토목, 궤도 기술이 종합된 시스템 엔지니어링 기술과 관련하여 운전에 필요한 데이터를 일관적으로 관리, 효율적인 운용이 가능한 종합 관리 시스템 기술의 확보가 가능할 것이고, 운전형태별로 필요한 시스템 및 안전설비의 효율적 유지보수 기술향상, 운전 및 신호 제어기술 확보를 통한 도시철도차량 운전 안정성 확보가 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 도시철도운전규칙 (건설교통부령 제4호)
2. IEC 62290-1 (First edition 2009-07)
3. 세계의 지하철(사단법인 일본 지하철협회), 2005년판
4. Hitachi Review, "One person operation support system for urban railway", Vol. 53 (2004) No. 1
5. 日立 評論, "Automatic operation system for Subway", Vol.87(2005.9) No.9