

경량전철의 무인자동운전 구현을 위한 신호제어시스템 연구



윤용기



백중현



최규형

1. 서론

1974년에 서울지하철 1호선이 개통된 이래, 지하철은 대도시의 교통난 해소에 중추적인 역할을 하고 있으며, 현재에도 많은 지하철건설이 계획되고 있다. 그러나 지하철 건설에 소요되는 막대한 예산과 공공교통이라는 명분에 의한 이용요금의 경직성 때문에 발생하는 운영비용의 적자로 인해서, 보다 경제적이고 효율적인 새로운 도시철도의 도입을 고려하게 되었으며 그 대안으로 경량전철시스템 도입이 적극 추진되기에 이르렀다.

이에 따라 건설교통부의 도시철도기술개발사업의 일환으로 한국형 경량전철시스템기술개발사업(1999~2004)이 수행되고 있다. 개발하고자 하는 경량전철시스템에서는 무인자동운전방식을 목표로 하고 있는데, 이는 운영효율의 향상과 동시에 이용자에게 안전하고, 쾌적한 양질의 서비스를 제공하고자 하는 여러 지방자치단체의 요구사항을 감안하고, 일본·영

국·프랑스·미국 등에서 중대한 결함이나 사고 없이 무인자동으로 경량전철을 운행하고 있어 국내에 도입하는 것이 가능하다는 판단에 의한 것이다.

2. 신호제어시스템의 기능

경량전철시스템은 자동운전이 가능한 시스템으로 자동운전(유인)과 무인자동운전으로 구분을 할 수 있다. 이에 대한 구분을 표.1에 나타내었다. 표.1에서 알 수 있듯이 무인자동운전이 가능하기 위해서는 지상과 차상에 대한 모든 기능을 자동화하는 것이 요구되므로 신호시스템을 중심으로 차량, 전력, 통신 등을 구성되고 각 기능을 갖도록 하는 것이 필요하다.

무인으로 자동열차제어를 하는 신호시스템은 ATP(Automatic Train Protection), ATO(Automatic train Operation) 및 ATS(Automatic Train Supervision)으로 구성된다. ATP는 경량전철시스템을 운행하는데 있어 vital 및 safety 기능을 담당한다. ATO 및 ATS는 non-

vital 및 non- safety 기능을 담당한다. 현재 개발중인 경량전철신호제어시스템, APM(Automatic People

Mover) 및 CBTC(IEEE의 표준화작업)의 각 장치별 기능을 표.2에 나타냈다.

〈표. 1 경량전철시스템의 자동화 분류〉

기능	수동운전	자동운전	무인운전
securing of the railway	자동화	자동	자동
localization of the train	자동화	자동	자동
driving of the train	수동	자동	자동
clearance of the train	수동	수동	자동
observation of the railway	수동	수동	자동
identification of interferences	수동 및 자동	수동 및 자동	자동

〈표. 2. 신호제어시스템 기능 분류〉

	CBTC	APM	경량전철 개발사양
ATS	- 사용자 I/F - 자동화된 ATS 기능 - 수동처리 기능 - off-line schedule builder, 시뮬레이션	- 자동·반자동 운영 - 열차운행중지, 동력 차단 및 시스템폐쇄 (운영관리자) - 자동제어기능·운전 모드조정·열차추적·운행시각조정·열차운전정리 - 시스템모니터링, 오작동/고장경보 - 화재/침입경보데이터 기록/보고	- 사용자 I/F - 열차확인·열차 추적 - 열차진로결정, 자동열차조정, 역정차기능 - 열차운행제한·장애보고·통신 기능
ATP	- 열차위치확인 - 속도 결정 - 안전거리확보 - 과속방지, 제동보충 - 제로속도 검지 - 연동(출입문·출발 연동·비상제동) - 작업지역·작업 열차보호 - 레일파손감지·간널목 경고 - 롤백방지·종단역 보호 - 열차 분리/연결	- 열차위치확인 - 열차확인 - 제동거리 확보 - 과속도방지(속도명령) - 제로속도 검출 - 열차움직임 검출 - 신호통신두절 시 비상 제동 발생 - 출입문개폐·출입 문연동 - 과주방지 - 열차편성·차량분리(제동) - 연동보호	- 열차위치결정 - 열차속도결정 - 안전열차간격 - 과속방지, 제동보충 - 구름방지, 종단역 보호 - 편성보호(열차 분리·결합) - 영속도검지 - 연동(출입문 개방제어보호, 출발, 비상제동, 진로, 주행방향 전환) - 작업지역·작업 열차보호 - 제한된 진로보호
ATO	- 자동속도조정 - 정밀정차·정차제어 - 출입문 제어 - 열차상태정보전송 - 승객정보시스템 인터페이스 - MMI	- 가·감속 제어 - 정밀정차 - 출입문 제어 - 정차시간	- 자동속도조정, 역 정차 제어 - 열차 출입문 제어

3. 경량전철 신호제어시스템의 구성

무인자동운전구축을 위해서 신호제어시스템이 갖추어야 할 기본조건은 유인자동운전일 때 운전자가 조치하는 사항을 사령실에서도 충분히 할 수 있도록 시스템이 구성되어야 한다는 것이다.

1) 통신시스템

유인자동운전의 경우 운전자는 열차의 상태를 항상 모니터링하면서 필요에 따라서 출입문·실내등·에어컨 등의 전장품을 제어하고 열차의 장애 및 고장이 발생하는 경우 이에 필요한 적절한 조치를 바로 취한다. 그러므로 무인자동운전을 하기 위해서는 지역사령실 또는 중앙사령실에서 각 열차의 운행상태를 실시간으로 모니터링을 하면서 고장이나 장애가 발생할 경우 바로 조치를 취할 수 있어야 한다. 그러나 현재 사용중인 궤도회로방식으로 사령실에서 열차의 상태를 실시간으로 모니터링하는 것은 어렵다. 따라서 이러한 조건을 만족할 수 있는 별도의 통신시스템을 구축하여야 한다.

현재 무인자동운전을 하고 있는 동경의 유리카모메라인, 런던의 도크랜드라인 및 뱅크버의 스카이라인 등은 주행선로에 3개정도의 루프를 설치하였다. 첫 번째 루프는 열차검지 및 속도제어를 위해서 사용된다. 두 번째 루프는 열차의 상태정보를 지상으로 전송하고 또한 승객과 사령실간 음성통신을 하는데 사용된다. 세 번째는 열차가 역에 정차하였을 때 출입문(플랫폼도어)의 개폐 및 열차출발제어를 하는 기능으로 사용된다. 그림. 1은 대표적인 무인운전시스템인 MATRA- SIEMENS의 VAL 시스템의 통신시스템을 간략화 한 것이다.

한편 개발중인 경량전철신호제어시스템은 지상과

때 발생하는 돌풍을 차단하여 승객의 불편감을 제거할 수 있다. 셋째 역사 내 정화된 공기와 터널의 오염된 공기를 강제적으로 분리하여 승객에게 깨끗한 환경을 제공할 수 있다. 넷째 역사내의 냉·난방된 공기가 터널로 방출되는 것을 차단할 수 있어 역사내 에너지효율을 높일 수 있다.

장애물검지장치의 경우는 개방된 역사에 적절한 것으로 설치가 간단하고 비용이 플랫폼도어에 비해서 상대적으로 저렴하다는 장점이 있다.

현재 플랫폼도어를 설치하지 않은 대표적인 경량전철노선인 Vancouver의 Sky Line과 London의 Dockland의 경우 기존 지하철에 비해서 승객의 자살율이 상대적으로 낮기 때문에 채택을 하지 않고 있다.

경량전철 신호제어시스템에서는 각 역마다 설치되는 역ATO장치에서 플랫폼도어제어장치에 개·폐 명령을 하고, 플랫폼도어제어장치는 이에 따라 명령을 수행하며 플랫폼도어에 장애물이 끼이는 경우는 플랫폼도어제어장치에서 재개·폐를 직접 수행하도록 기능을 정의하였다.

4. 신호제어시스템의 안전성 확보

경량전철시스템을 무인자동시스템으로 구축하기 위해서는 지상과 차상에 설치되는 신호제어시스템이 모든 기능을 가능한 자동화하는 것이 요구되지만, 각 장치가 충분한 신뢰성을 확보하여만 무인자동운전을 위한 안전성을 확보할 수 있다. 이를 위해, 무인자동운전을 하는데 있어 발생할 수 있는 기본적인 위험요인의 분석 및 안전성 검증절차를 체계적으로 수행할 필요가 있다.

4.1 위험성분석

해외에서 운행되고 있는 경량전철시스템의 위험의 종류를 보면 표3과 같다. 이러한 위험사항은 경량전철

〈표. 3 경량전철시스템의 위험성 분석〉

분야	분류	위험내용설명	
전기	750V 초과	전기충격 노출	
		안내면 전력공급선 접촉	
		750V의 전력공급원과 접촉	
		고전압/대전력용 스위치 접촉	
			차체 내부에서 전기적 접촉
대전류		유지보수요원이 전력컨테이너와 접촉	
		전류용량 25A 또는 초과하는 회로 및 bus가 있음	
		급전선과 접촉하여 대전류가 흘러 장치/사람 상해	
접지		접지단선(날씨, 기계적 마모, 먼지 및 고정장치 풀림)	
		접지가 안된 도전체에 의해서 접지가 끊어짐	
정전기		정전기에 민감한 구성품이 위험을 받음	
기계	구동부	벨트·회전축·냉각팬·차륜 등 회전체에 의한 상해	
	발생	출입문 개·폐 때문에 걸리거나 끼어서 상해발생 출입문조작시간 오류로 상해발생	
기계	조작	유지보수 때 열차구동에 의한 잠재적 위험 구성품이탈(차량의 구조적 결함, 취부 불량)	
화학	폭파	지상용 배터리에 있는 폭발성 물질 배터리 과충전으로 폭발성 물질 발생	
	화재	역사화재로 발생된 열·연기·독가스에 승객이 노출 전장품·제동장치·승객이 소지한 인화물질에 의해서 열차에 화재발생	
기타	열차 출발	승객이 승하차하는 동안 감시소홀로 열차가 움직여 승객에게 상해를 입힘	
	파편, 잔해	주행중인 열차에 의해서 선로에 있는 물체가 움직여 선로·역사에 있는 사람이 상해 입음 차량과 선로 근처에 있는 구조물에서 떨어져 나온 물체와 충돌 선로 파편이 떨어져 사람이나 장비에게 상해 선행열차의 파편과 후속열차가 충돌 선로에 낙하된 물체(자동차·동물)와 충돌하여 선로와 차량에 위험을 초래 선로에 있는 눈, 얼음 및 선로의 흙 때문에 열차가 미끄러져 선로와 차량에 많은 피해 초래	
		선로·차량 구성품·투척물 등의 잔해로 장치 및 사람에게 상해를 입힘. 선로 돌출부분과 차량이 충돌하여 돌출부가 선로를 관통함.	
	구조 결점	차량과선로간 충돌·선로구성품 약화·불량품·차량·선로 공진·피로·열·고의적 파괴 등으로 선로 파괴 원인 제공	
	차량 충돌		열차진입 때 승강장 대기 승객이 너무 접근하여 진입 하는 열차와 충돌
			비상제동 시 열차 내 승객이 차량장치와 충돌
			제동력 부족으로 차량과 안내면 충돌
			차량돌출부와 선로통행로에 있는 사람과 충돌
			역사에서 던져진 물체와 열차와 충돌
			열차간 안전간격유지 불량으로 충돌
차륜의 파손(펑크)로 안내면과 충돌			
차륜이 떨어져 나와 안내면과 충돌			
수동조작 중 다른 차량과 충돌			
차량과주로 종단역 정지장치의 충돌			
선로에 있는 사람을 확인하지 못하여 충돌			

분야	분류	위험내용설명
차량 충돌		차량- 선로간 이격거리유지불량으로 충돌
		선로의 분기구간 또는 결합구간에서의 인터페이스 실패로 충돌
		제동장치 불량으로 차량간 충돌
		제동력 부족으로 안내면과 충돌
		안내륜의 고장(파손, 이탈)로 열차와 안내면과 충돌
		열차의 충격흡수장치의 고장으로 안내면과 충돌
		허기없는 상태에서 분기부 진입으로 안내면과 충돌
		스위치와 열차간 비동기로 인해서 안내면과 충돌
		열차위치추적불량으로 다른 열차가 접근하여 충돌
		자동열차제어상태에서 다른 열차와 충돌
		수동제어상태에서 다른 열차와 충돌
		속도연산오류에 의해서 다른 열차와 충돌
		지상- 열차간 통신 두절로 다른 열차와 충돌
		열차주행방향 오류로 다른 열차와 충돌추락
		열차 출발 때 열차에서 승객 추락
		선로주변에 있던승객이 선로로 떨어져 상해를 입음
		눈·얼음·물기로 승강장에서 선로로 승객이 추락
		승강장 양 끝단의 개방부분에서 승객이 선로로 추락
		정밀정차불량으로 승객이 차량밖으로 떨어짐
		기타
비상제동이 시 출입문이 개방되어 승객이 밖으로 튕겨나감승객이 열려있는 출입문에서 추락함.		
출입문이 운행중 개방되어 승객이 대피중에 안내면의 전원선과 접촉하여 전기적인 충격을 받음		
열차정차상태에서 전력차단으로 출입문 개방불가.		

시스템의 선로구축물분야, 차량시스템분야, 전력공급 시스템분야, 신호제어시스템분야 및 유지보수설비분야에서 발생된다.

4.2 안전성검증절차

경량전철을 운행하기 위해서는 위와 같은 위험요소를 확인하고, 발생빈도 및 발생 시 위험의 정도를 특징 짓고 이를 검증하는 일련의 절차가 요구된다. IEEE 1483(철도수송에 사용되는 프로세서기반시스템의 안전검증)규격에 의하면 안전검증과 관련된 일련의 활동은 다음 세 가지 단계로 나뉘어진다.

1) 개념단계(concept level)

개념단계에서 수행하는 작업은 다음과 같다.

- 필수기능들의 fail- safe 구현을 보장하기 위해 도입한 안전보장개념 정의
- fail- safe구현의 보장이 종속적인 개념레벨에서 구체화된 인자들의 포괄적인 확인
- fail- safe구현을 위한 개념- 특수성 디자인요구사항 정의
- 개념- 특수성 디자인 요구들을 만족과 fail- safely를 구현하고 있는 필수기능검증을 하는 구현단계에서 적용한 검증 방법들의 확인

2) 기능단계(functional level)

기능단계에서는 프로세서 기반 장비에 의해 구현된 사용자 특수화된 시스템기능성능과 연관된 안전- 임계기능을 포괄적으로 확인하는 분석(analysis)기능을 포함한다. 안전- 임계기능들은 FFE(functional fault tree)를 사용함으로써 확인 할 수 있다.

3) 구현단계(implementation level)

구현단계에서 수행되는 검증내용은 각 서브시스템 내의 인증된 필수 기능들의 구현에서 포함된 하드웨어와 소프트웨어의 동정을 포함한다. 더불어, 이 동작은 앞서 정의한 시스템 안전 목표에 의해 요구된 정도에 맞게 fail- safely를 구현하고 있는 중요 기능들을 검증하기 위한 개념- 특수성 검증 방법의 응용을 포함한다.

5. 결론

경량전철시스템은 대기시간이 짧고 주행속도가 높아 도로교통에 대해서 충분한 경쟁력을 확보할 수 있다. 짧은 운행시격을 갖고 충분한 안전성을 확보하기 위해서는 차상, 지상 및 사령실에서 수행되는 대부분의 업무를 자동화하는 것이 요구된다. 그리고 확보

된 안전성과 경제성을 충족시키기 위해서는 열차의 운행을 무인자동화하는 것이 필요하다.

경량전철시스템을 무인자동으로 운전하기 위해서는 다음 몇 가지를 충분히 만족하여야 한다.

- 열차간 충돌, 열차와 승객과의 충돌 등 승객과 설비에 위험을 초래할 수 있는 위험요인을 사전에 확인을 하여야 한다.
- 확인된 위험요인을 바탕으로 하여 개념단계, 기능단계 및 구현단계를 거쳐 안전성을 검증하여야 한다.
- 신호제어시스템의 기능을 vital한 기능을 수행하는 ATP, non-vital한 기능을 수행하는 ATO, ATS로 구분한다.
- 사령실(지역, 중앙)에서 실시간으로 열차의 상태를 감시하고 원격제어가 가능하도록 충분한 통신망을 확보하여야 한다.
- 승강장에서 승객이나 물건이 선로로 추락하여 열차와 충돌 또는 급전선과 접촉에 의한 사고가 발생하지 않도록 플랫폼도어 및 장애물검지장치를 설치하여야 한다.

이밖에, 운행시격이 짧기 때문에 열차고장으로 주행이 불가능한 경우 단위길이 당 투입되어 있는 열차편성수가 기존 지하철에 비해서 많기 때문에 고장난 열차를 빠르게 구인하기 위한 방안 등 무인자동운전에 따라 예상되는 문제점을 충분히 검토되어야 한다.

참 고 문 헌

1. John J. Marino, "Driverless Transit in Lille, A Decade o Experience", the APTA Rapid Transit Conference, 1996
2. Gunni S. Frederiksen, "The Fully automated Metro in Copenhagen", 2000
3. "Automated People Mover Standards- Part1", ASCE21- 96
4. "Communication-Based Train Control Performance and Functional Requirements" IEEE P1474.1/D5.0, Nov 1998