

완전자동무인운전에 대한 신호제어시스템의 안전성 검토

A Review on the Safety of the Railway Signal System for Fully Automated Manless Operation

이재봉† 정계용* 이해철** 최시행***
Jaе-Bong Lee Kye-Yong Jung Hae-Cheol Lee Si-Haeng Choi

ABSTRACT

LRT(Light Rail Transit) is currently adopting a more upgraded signal system these days.

This latest signal system is a train on-board signal system with moving block based on the realtime bi-directional wireless communications.

The system applies RF-CBTC(Radio Frequency - Communication Based Train Control System) in order to execute fully automated manless operation.

This paper reviews the performance requirements and safety of RF-CBTC that will be applied to the fully automated manless operation for LRT.

1. 서론

수도권에 근접한 중소도시의 환경친화적 대중교통인 경량전철을 건설하면서, 신호제어시스템으로 실시간 양방향 무선통신을 기반으로 하는 이동폐색방식을 적용한 차상신호방식으로 완전자동 무인운전을 실행하고자 열차제어시스템(RF-CBTC : Radio Frequency - Communication Based Train Control System)을 도입하고 있다.

본 논문에서는 경량전철의 완전자동 무인운전 구현에 적용할 열차제어시스템(RF-CBTC)에 대한 성능 조건과 안전성을 검토하였다.

2. 본론

2.1 신호제어시스템의 기술동향

21세기로 진입하면서 급속히 발전하고 있는 컴퓨터제어기술과 통신기술을 이용하여 설비의 전자화를 적극적으로 추구하고 있으며, 더욱이 최근에는 철도선진국을 중심으로 무선통신기술을 기반으로 하는 열차제어시스템기술을 경쟁적으로 개발하여 상용화를 추진하고 있다. 미국은 FTA(Federal Transit Administration)의 후원 하에 IEEE(Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc)를 통해서 CBTC(Communication Based Train Control)표준화를 포함한 TCRP(Transport Cooperative Research Program)과제를 추진하고 있다. CBTC시스템에 대한 표준을 담당하는 IEEE RTVISC WG2는 CBTC시스템의 지상-차상 및 차상-지상의 인터페이스에 대하여 표준을 마련하기 위하여 북미의 모든 CBTC 시스템의 주요 공급회사 및 잠재 공급회사의 CBTC 시스템에 대한 정보를 공유하도록 하고 있다.

유럽의 ETCS(European Rail Control System) 프로젝트는 1990년부터 EC(European Community)의 지원 하에 시작한 유럽의 통합열차제어시스템 개발사업을 말한다. 유럽통합을 위해서 우선적으로 철도, 도

† 정회원, 서울메트로, 철도사업단(김포), 처장
E-mail : catenarysm@paran.com
TEL : (031)980-8707 FAX : (031)980-2564
* 비회원, 서울메트로, 철도사업단(김포), 과장
* 비회원, 서울메트로, 철도사업단(김포), 차장
** 정회원, 서울메트로, 철도사업단(김포), 차장

로, 해상 수송, 항공 수송 등의 효율적인 연계를 검토하였고, 철도분야에서는 TRANS- European Network란 국가간 철도망 구축을 목표로 표준화 작업을 전개하고 있다. TRANS-European 철도망을 구축하기 위해서는 상이하게 발전해온 서로 다른 시스템의 인터페이스가 필요하지만, 이것이 불가능하다는 판단에서 표준적인 시스템 통합을 연구하게 되었다.

2.2 신호제어시스템의 폐색방식의 비교

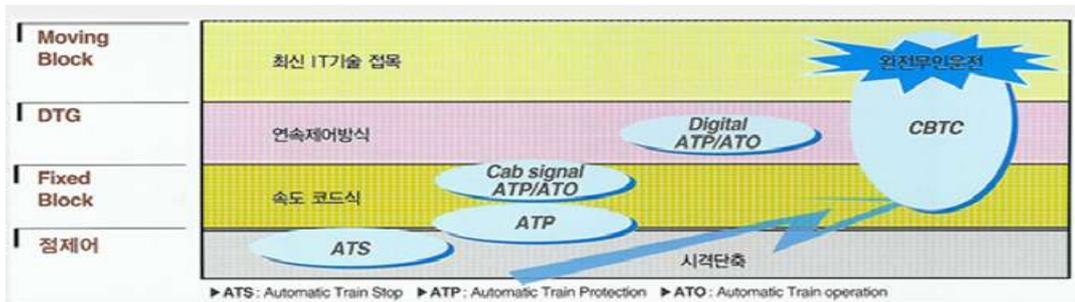
1) 고정폐색방식

- 속도코드식(Fixed Signaling) : 선행열차에 대한 후속열차의 감속 및 제동은 지상에서 수신된 고정속도코드에 따라 제동곡선이 계단형태로 열차가 제어됨(다단계 제동)
- Distance-To-Go(DTG) : 선행열차에 대한 후속열차의 감속 및 제동은 지상의 디지털 정보를 수신(Digital ATC)하여 차상의 컴퓨터장치에서 계산된 제동곡선에 따라 열차가 제어됨(1단계 제동)

2) 이동폐색방식 :

- Moving Block System(MBS) : 선행열차에 대한 후속열차의 감속 및 제동은 차상 컴퓨터와 지상 컴퓨터간의 디지털 정보를 송수신하여 차상의 컴퓨터장치에서 계산된 제동곡선에 따라 열차가 제어됨(1단계 제동)

그림 1. 신호제어시스템 단계별 발전과정



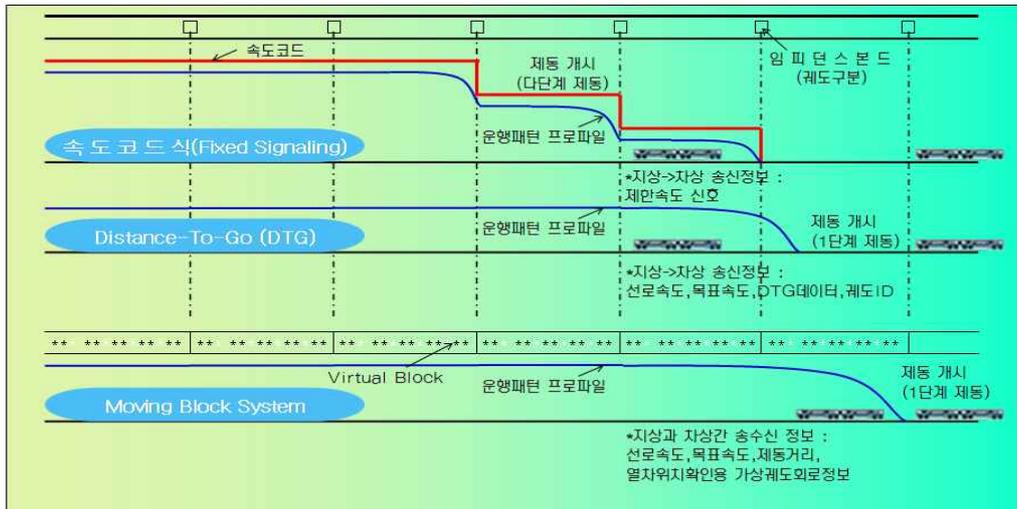
3) 폐색방식에 대한 구성과 특성은 표1과 같다.

표 1. 폐색방식 특성비교

구 분	단계별 속도코드 전송방식	차상제어연산방식	이동폐색방식
설비의 구성	<ul style="list-style-type: none"> • 궤도회로장치 • 속도Command전송 Logic 	<ul style="list-style-type: none"> • 궤도회로장치 (레일 또는 Loop Coil) • 선로 Data 전송 Logic • ATO Transponder 또는 Antenna 	<ul style="list-style-type: none"> • Wire Loop(LCX) • 무선기지국
열차검지	<ul style="list-style-type: none"> • 궤도회로장치 	<ul style="list-style-type: none"> • 궤도회로장치(ATP/TD장치) 	<ul style="list-style-type: none"> • 유도무선에 의한 Loop 또는 열차무선
열차와 지상간의 통신	<ul style="list-style-type: none"> • 지상→차상으로 속도 Code 전송(제한적) • TWC 송·수신장치 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 지상→차상으로 선로Data 전송 	<ul style="list-style-type: none"> • 유도무선에 의한 Loop 또는 열차무선에 의한 통신
열차속도 제어	<ul style="list-style-type: none"> • 일정한 속도 Code에 의해 제어되므로 Code의 다변화 제한 	<ul style="list-style-type: none"> • 지상의 선로 Data 수신에 의해 차상속도 Code의 다변화 	<ul style="list-style-type: none"> • 차상속도 Code의 다변화
제동정차 지점	<ul style="list-style-type: none"> • 폐색구간 내 임의의 지점 	<ul style="list-style-type: none"> • Program에 의해 정의된 제동거리가 확보된 정차 지점 	<ul style="list-style-type: none"> • 선행열차의 후부가 정차 지점
Headway 조정	<ul style="list-style-type: none"> • 최소 폐색 분할에 의하여 결정 • 최소운전시각 120초까지 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 선행열차 간격에 의해 감속이 이루어짐 • 최소운전시각 90초까지 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 선행열차 간격에 의해 감속이 이루어짐 • 최소운전시각 60초까지 가능

4) 고정폐색방식과 이동폐색방식에 대한 특성곡선은 그림2와 같다.

그림 2. 고정폐색방식과 이동폐색방식 특성곡선



5) 주요 국가별 신호제어시스템의 안전성 및 특징은 표2와 같다.

표 2. 주요 국가별 신호제어시스템의 비교

Product	K-AGT CBTC	URABLISE 300	AATC	CARAT
국가명 (도시명)	대한민국	프랑스	미국(샌프란시스코)	일본(철도총연)
Maker	철도기술연구원, 포스콘	ALSTOM	BART, 일본신호	경삼, 일본신호, 미쓰비시, 대동
개발 Concept	설치비절감, 시격단축 군사기술 응용, 현재기술 중첩가능	설치비절감, 시격단축 현재기술 중첩가능	시격단축, 군사기술 응용 현재기술 중첩 가능	차세대시스템 비용절감
안정성	Vital 위치추적, 이중계 Fail-safe	Fault-tolerant Fail-safe	Vital위치추적 이중화, 부호감시, Fail-safe	Fault-tolerant Fail-safe
특 징	스펙트럼 확산 2.45[GHz] EPLRS (무선에 의한 위치검지)	EuroBalise GSM방식	스펙트럼 확산 2.4-2.485[GHz] EPLRS (무선에 의한 위치검지)	LXC 400[MHz] 상월신간선 실험 시스템
효 과	ATC기반&완전자동 무인운전구현 선로변 설비 철거	선로변 설비 철거	ATC기반&무선전력절감	선로변 설비 철거

2.3 CBTC 시스템 개요

열차제어시스템은 열차운행에 대한 안전성을 보장하는 핵심역할을 수행한다. 열차제어는 운행 열차간의 안전거리를 유지하고, 열차가 언제라도 안전하게 동작할 수 있는 속도를 결정하는 원리가 준수되고 있다는 것을 보증하는 일련의 수단이다.

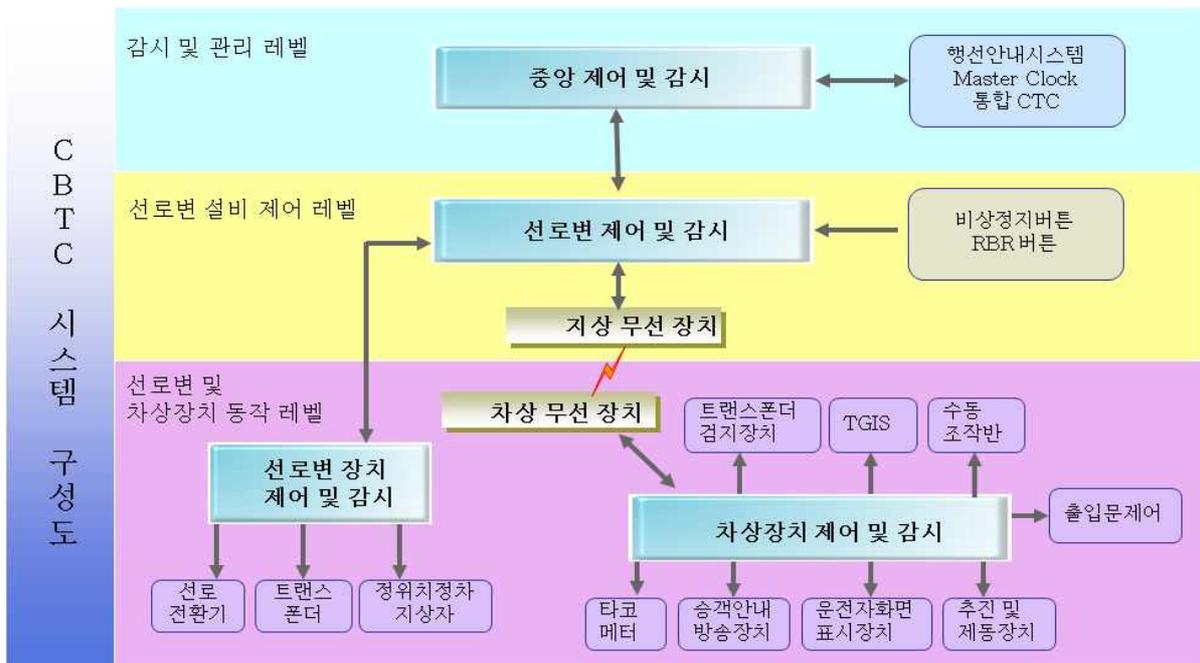
CBTC란 Communication-Based Train Control의 축약어로, 통신 및 정보기술을 기반으로 하는 일종의 철도신호기술을 말한다. 이러한 CBTC 시스템은 연속·자동의 열차제어시스템으로 자동열차감시장치(ATS, Automatic Train Supervision) 및 자동열차방호장치(ATP, Automatic Train Protection), 등의 하부시스템으로 구성된다. 지상-차상간의 통신을 통하여 궤도회로와 무관한 열차위치결정, 고용량의 양방향 데이터 통신, 열차속도 및 시스템 기능에 대한 안전제어 등의 기능을 수행한다. 이를 위한 통신에는 유도루프나 무선통신 방식이 있다.

유도루프(Inductive Loop)를 선로를 따라 일정간격(약 25m)으로 크로스하게 설치하여 위상의 변화로

열차의 위치를 인식하고 그 루프(Loop)를 통해 열차와 지상간의 통신도 병행하는 방식이 이용되었다. 그러나 이 유도루프 방식은 대용량의 정보를 전송하는데 한계가 있으며, 전 선로변에 유도루프를 설치하여야 하므로 유지보수가 어려운 단점이 있다. 1990년대 말 무선통신장비의 발달로 무선랜 표준으로 IEEE 802.11이 제정되고 이를 이용한 열차제어시스템이 탄생하게 되었다. 이와 같은 시기에 IEEE Rail Transit Vehicle Interface Standard Committee 주관으로 Working Group 2에서 CBTC 표준으로 IEEE Std 1474가 만들어졌다.

현재 IEEE Std 1474 아래에 1474.1-2004, 1474.2-2003 그리고 1474.3 등 3개의 표준이 마련되어 있다. CBTC 시스템은 ATP 기능, ATO 기능 및 ATS 기능을 수행한다. ATP 기능은 열차간 충돌 방지, 과속 방지, 기타 위험 상태 등에 대한 안전측 동작(fail-safe) 등을 수행한다. 이러한 ATP 기능은 ATO 및 ATS 기능 수행에 우선된다. ATO 기능은 기관사를 대신하여 열차 운전제어를 수행하며, ATP의 보호한계 내에서 이루어진다. ATS 기능은 시스템 상태정보 및 감시 수단을 제공하며, 시스템의 각종 기능에 대한 자동제어를 수행한다. CBTC시스템의 구성 예시는 그림 3과 같다.

그림 3. CBTC시스템의 구성 예시



2.3.1 CBTC 장점 및 효과

- 1) 열차운행의 고안전성 확보
 - 정확한 열차추적 시스템 확보
 - 중요 Vital 시스템 및 네트워크의 이중계 구축
 - CENELEC 규정을 준수하는 안전성 검증
- 2) 수송 효율의 극대화
 - 자동 회차기능으로 인한 회차시간 단축
 - 운행속도 향상에 의한 주행시간 단축
 - 열차지연 회복을 위한 열차조정 기능
- 3) 유지보수의 효율성
 - 모듈단위설계로 인한 유지보수성 및 확장성
 - 원격 및 자기진단 기능의 강화

2.3.2 국내 CBTC시스템 구축사례

현재 국내 경전철에 적용하여 상용화 단계에 있는 CBTC시스템 구축현황은 표 3과 같다.

표 3. 국내 CBTC시스템 구축현황

구 분	용인경전철	부산4호선(반송선)	부산-김해 경전철	인천지하철2호선
사업명	용인 경량전철 사업	부산지하철 4호선	부산-김해간 경량전철 민간투자사업	인천도시철도 2호선 건설사업
사업연장	18.4km	12.7km	23.9km	29.3km
사업구간	구갈~에버랜드 (15개역,차량기지)	미남역~안평역 (14개역)	신명역~사상역 (18개역,차량기지)	서구 오류동~남동구 인천대공원 (27개역)
총 사업기간	2005.12~2010.	2003.11~2010.12	2002.12~2011.4	2009.2~2014.7
공급사	BOMBARDIER	K-AGT	THALES	현대ROTEM(THALES)
선로조건	지상· 지하구간	지상· 지하구간	지상구간(고가)	지상· 지하구간
신호시스템	CITYFLO 650 (Bombardier)		SelTrac s40 (THALES)	SelTrac s40 (THALES)
통신방식	RF	RF	RF	RF
무선주파수	2.4[GHz]	2.4[GHz]	2.4[GHz]	2.4[GHz]
열차위치검지		타코미터 및 트랜스폰더 태그	타코미터 및 트랜스폰더 태그	타코미터 및 트랜스폰더 태그
차량형식	경전철(2량1편성)	경전철(6량1편성)	경전철(2량1편성)	경전철(2량1편성) 최대(4량1편성)
운전방식	ATO 무인운전	무인자동운전	ATO 무인운전	무인자동운전
운전시격	135초(2009년)		개통년도 : 3.5분	3분 ~ 3분20초

2.4 RF-CBTC 시스템의 성능요구조건과 안전성

2.4.1 현재 RF-CBTC 시스템의 검토

공급사별	Bombardier	Siemens	Thales(구, 알카텔)
제 품 명	•CITYFLO 650	•Metero	•SelTrac S40
시스템개요 및 기능	•CITYFLO 650은 2003년 1월에 상업운행을 개시한 무인운행에 적합한 시스템 •주요 기능 - 양방향운행, - 차량기지 자동운전 - 최소 운전시격 단축 - 지상~차상간 연속통신	•최적의 운전시격 단축을 위한 솔루션 •열차 편성수 및 운전방식 변경에 효율적	•다양한 시스템 기능과 신속한 장애 복구 기법 제공 •중계 시스템 운용자의 운용 효율과 안전성보장 •전다동 무선기반의 ATC장치 열차의 안전한 이동제어
열차제어방식	•차상신호제어방식	•차상신호제어방식	•차상신호제어방식
운전방식	•완전자동 무인운전 가능	•완전자동 무인운전 가능	•완전자동 무인운전 가능
지상-차상 간 통신방식	•LCX통신방식 : 동축케이블(LCX)사용	•AP 통신방식 : 무선안테나 AP(Access Point)사용	•AP 통신방식 : 무선안테나 AP(Access Point)사용
사용주파수	•2.4[GHz] 영역	•2.4[GHz] 영역	•2.4[GHz] 영역
신호용 통신네트워크	•별도 구성(2중계) - 신호용 네트워크 : Vital 기능 - 통신용 네트워크 : Non Vital 및 통신	•별도 구성(2중계) - 신호용 네트워크 : Vital 기능 - 통신용 네트워크 : Non Vital 및 통신 - 무선안테나(AP)용 네트워크 별도 포설	•별도 구성(2중계) - 신호용 네트워크 : Vital 기능 - 통신용 네트워크 : Non Vital 및 통신

2.4.2 RF-CBTC 시스템의 성능 요구조건

공급사별	Bombardier	Siemens	Thales(구, 알카텔)
CBTC제품명	•CITYFLO 650	•Metro	•SelTrac S40
주요기능	ATP	<ul style="list-style-type: none"> •ATP(Vital) 제어 •ATO(Non Vital) 제어 •수리 중 운전 지원가능 •열차 운전 중 연송통신 모드 •역간 자동주행 •자동 출발 및 열차 역행 •바람직하지 않은 장소 정지 제어 •운행시간 및 에너지의 최적화(타행 및 순항) •무인(Driverless)운전 지원 	<ul style="list-style-type: none"> •연속적인 전방향 열차위치감지 •안전한 열차 이격 •선로저환기 쇄정 •진로구성 및 쇄정 •열차의 속도 제한 •열차 운행방향 감지 •열차의 후진(rollback) 감지 •열차 출입문 통제 •열차의 무결성 감지 •논리블럭 기법(Software Logic Blocks) 이용
	ATO	<ul style="list-style-type: none"> •명령에 의한 속도 프로파일 생성 •승차감 제어(VATO) •정거장 정위치 정차 •속도 유지 •출입문 제어 요청 •음성안내방송 및 차상트리거 •시스템 및 상태 디스플레이 •모든 ATO기능은 ATP기능에 종속됨 	<ul style="list-style-type: none"> •열차속도 제한 명령 제공 •운용정책기준에 맞추어 안전한 승객 탑승 품질보장 •정거장 정차 시간관리 •차량 내 탑승자정보 시스템 관리
	ATS	<ul style="list-style-type: none"> •운행열차 규모를 편성하고, 감소를 포함하여 일정표, 운전정리, 관제의 명령하에 진로설정을 지원하는 열차운행명령 •시스템 상태 표시 •운전관제사와 시스템운영의 효율적인 감독과 관리를 허용하는 기능성 제공 •열차운행, 시스템성능 및 상태데이터를 표시하고 기록 	<ul style="list-style-type: none"> •운행열차 규모를 편성하고, 감소를 포함하여 일정표, 운전정리 및 관제의 명령하에 진로설정을 지원하는 열차운행명령 •시스템 상태 표시 •운전관제사와 시스템운영의 효율적인 감독과 관리를 허용하는 기능성 제공 •열차운행, 시스템성능 및 상태데이터를 표시하고 기록 •지상 및 차상 정보 통제 •데이터 로깅 기능제공

2.4.3 RF-CBTC 시스템의 안전성 요구조건

완전자동 무인운전을 위해 가장 필요한 것은 시스템의 가용성과 안전성이 입증될 수 있도록 열차제어시스템이 완전한 이중계로 구성되어 있어서 비상시에도 열차를 안전하게 운행할 수 있고 승객을 보호할 수 있는 신뢰성이 매우 우수한 시스템이어야 하며, RF-CBTC의 특성상 지상-차상간 데이터 송·수신시 여러 경로를 거치지 않고 직접 데이터를 송·수신 하여 데이터 송·수신 오류로 인한 열차운행에 지장을 주지 않는 시스템 이어야 한다.

1) 자동열차방호장치(ATP : Automatic Train Protection)

- 열차의 안전운행을 담당하며, 안전 관련 S/W로 구현되어야 한다.

- 열차검지, Fail-Safe, 열차분리, 정지위치 확인, 속도제한 등의 기능을 수행하여야 한다.
- 선로변에 설치된 전송매체를 이용하여 양방향 무선통신으로 열차검지 및 열차제어가 가능하여야 하며, 차상 ATP가 생성한 열차검지정보는 전송매체를 통해 지상으로 전송하고, 지상 ATP는 이 정보를 근거로 연속적으로 열차검지를 결정하여야 한다.
- 트랜스폰더 또는 발리스에 내장되어 있는 회로는 주파수신호 등의 작은 영향에도 동작될 수 있기 때문에 이를 위한 무선주파수 빔은 제한적인 범위에서 동작하도록 하여 인접 지역의 다른 트랜스폰더 또는 발리스와의 영향을 주어서는 안되는 구조이어야 한다.

2) 자동열차운전장치(ATO : Automatic Train Operation)

- 자동열차운전장치(ATO)는 다중계 방식으로 구성되어야 하며, 열차이동 및 정거장 운영제어와 관련된 모든 Non-Vital 기능을 수행하여야 한다.
- 선로변 네트워크 전송망을 통하여 ATP 장치와 인터페이스 되어야 하며 또한, 신호전용 전송망을 통하여 ATS 장치와 인터페이스 되어야 한다.
- 선로변에 설치되는 트랜스폰더 또는 발리스 등은 밀폐형 구조로 열차진동 및 전자기 간섭으로부터 완벽하게 보호되어야 한다.
- 열차위치 확인용 트랜스폰더는 열차운행 방향에 따른 위치정보를 종합관제실 Server에 제공하는 고정형 구조이어야 한다.
- 선로내부에 설치되는 자재는 무보수형으로 침수, 강우 또는 열차진동에 영향을 받지 않도록 하여야 한다.

3) 자동열차감시장치(ATS : Automatic Train Supervision)

- 자동열차운행제어, 열차 출입문 개폐, 운영 데이터 관리 보고 및 전송, 정위치 정차, 열차운행 자동 조정, 자동 스케줄링, 실시간 또는 오프라인상에서의 스케줄 편집, 시각표 저장, 저장된 시각표의 활성화, 근무명부 관리를 위한 정보 데이터 제공, 열차번호 생성, 열차식별 서비스 및 시스템 분석, 사용자 인터페이스, 진로설정, 승객안내정보시스템을 위한 승객안내정보데이터를 제공하여야 한다.
- 자동열차 감시장치(ATS)에 장애가 발생한 경우 최소한의 열차위치를 검지할 수 있도록 Back-up 장치 기능을 수행하는 열차검지 보조기능이 있어야 한다.

3. 결론

최근 국내외에 앞 다투어 경량전철에 적용하는 완전자동 무인운전을 실현하기위한 무선기반 신호제어시스템(RF-CBTC)은 가장 필요한 것은 시스템의 가용성과 안전성이 입증될 수 있어야 하며 이를 위한 방안으로 완전한 2중계로 구성되어야 하나, 먼저 고려해야 할 사안으로 누구나 쉽게 지나칠 수 있는 무선통신기반의 핵심인 주파수 대역에 대한 검토가 필요하다.

현재 외국의 사례 및 국내 RF-CBTC신호제어시스템은 대부분 2.4[GHz] ISM밴드대의 주파수를 사용하고 있으며 이 ISM대역은 공업용, 과학용, 의료용 등으로 사용하는 주파수대역(무선전화기, WiFi 라우터, 블루투스 전화기 주변기기, 전기오븐 등)에서는 다양한 가정용 전자기기에서 사용되는 주파수이어서 신뢰성 있는 통신을 하기에는 혼신의 우려가 있다. 이러한 누구나 허가 없이 사용할 수 있는 주파수대역이 아닌 열차신호제어용 전용주파수대 설정하는 것이 시급하다고 예상된다.

참고문헌

1. “무선을 이용한 지상과 차상간 통신방식에 관한 연구” , 조봉관, pp3.
2. “무선통신기반열차제어시스템(CBTC)의 이해” , 이태훈, pp3.
3. “지능형 열차제어시스템 개요” ,2008.2. 삼성SDS, pp1.
4. “분당선 지능형 열차제어시스템 시범설비 구축(CBTC 신호시스템 소개)” ,철도공사, 손운락, pp9,10.