

이동통신기반 열차제어 기술과 무선통신 요구사항 연구

윤병식^{1*} · 최민석¹ · 김동준² · 오우식² · 성동일²

¹한국전자통신연구원 · ²한국철도시설공단

Study on Technologies of Mobile Communication based Train Control and its Radio Communication Requirements

Byungsik Yoon^{1*} · Minsuk Choi¹ · Dong Joon Kim² · Woo-Sik Oh² · Dong-Il Sung²

¹ETRI · ²KR Network Authority

E-mail : bsyoon@etri.re.kr

요 약

이동통신기반 열차제어 시스템은 열차의 차상장비와 선로변 지상장비간 연동을 유선통신을 이용하지 않고 이동통신을 활용하여 열차의 운행을 제어한다. 기존 열차제어는 열차의 점유 정보, 열차 무결성 정보 그리고 이동권한을 유선통신 기반의 고정 폐색 방식 기반으로 운영하고 있다. 최근 들어 철도 영역에서 이동 통신 시스템을 도입함에 따라 향상된 승객 서비스를 제공할 수 있을 뿐 아니라, 비효율적 차상과 지상 설비를 무선통신으로 대체함에 따라 높은 경제적 혜택을 제공할 수 있다. 본 논문에서는 각국에서 현재 운용중인 이동통신 기반 열차제어 시스템을 소개하고 각 시스템에서 사용하고 있는 무선 통신 방식의 특징과 운영 현황에 대해서 설명한다. 또한 무선 통신 시스템의 최소 성능 요구사항 연구를 통하여 열차 제어 신호가 무선망을 통하여 더욱 안전하고 효율적으로 전달될 수 있는 방안을 제시한다.

ABSTRACT

The mobile communication based train control is the train control system by utilizing wireless communication rather than conventional wired communication. Traditional train control operates train occupation, safety integrity and moving authority using fixed block wired railway signal system. Since introduction of mobile communication in railway area, railway operators can provide improved passenger services. Furthermore, it can replace inefficient train onboard equipments and railway ground facilities for economic benefits. In this paper we introduce mobile communication based railway system currently in operation around the world. Moreover, we provide the minimum requirements of the radio communication performance. Proposed minimum requirements of the radio communication improve more secure and efficient mobile communication based train control system.

키워드

철도통신, 열차제어, 이동 폐색, Mobile communication based train control

1. 서 론

최근 들어, 단순 관제 무선 통화에만 머물러 있던 철도 산업 영역에 이동 통신 기술이 접목되면서 다양한 철도 서비스와 안전하고 효율적인 열차 운영이 가능하게 되었다. 특히 이동통신 기반 열차 제어 시스템은 차세대 열차 제어 시스템으로 주목 받고 있는데, 유선 통신 기반의 열차 제어 시스템과 비교하여 무선 통신 기반 열차 제어 시스템을 적용하였을 경우, 구축비용은 25% ~ 40% 절감, 유

지보수 및 시설관리 비용은 25% 절감할 수 있을 뿐 아니라, 수송용량 또한 35% 이상 증대를 기대할 수 있다 [1].

다양한 장점에도 불구하고, 이동 통신 시스템 기반의 열차 운행 안전성과 효율성을 확보하기 위해서는 무선 네트워크 접속의 안정적 접속 유지 (Reliability) 와 통신 장애시 이를 극복하기 위한 가용성 (Availability) 제공되어야 한다.

본 논문에서는 세계 여러 나라에서 운용중인 이동통신 기반 열차제어 시스템을 설명하고 각 시스템의 무선통신 특징과 운영 현황을 설명한다. 또한 안전적 열차 운영을 위한 무선 통신 시스템의 안

* corresponding author

정성과 가용성에 대하여 설명하고 최소한의 무선 통신 성능 요구 사항을 제시한다.

II. 이동통신 기반 열차제어

1990년 세계철도연맹은 유럽 각국의 상이한 철도통신 시스템을 유럽 통합형 디지털 통신 시스템으로 전환 배치를 결정하고 GSM 기반의 이동통신 규격에 Advanced Services Call Item (ASCI) 철도 전용 음성 통화 규격과 European Train Control System (ETCS) 열차제어 신호를 통합하여 GSM-Railway (GSM-R) 개발하였다. GSM-R은 800MHz 대역에서 상하향 8MHz의 대역폭을 사용하며 무선 통신의 안정성 높이기 위하여 -90dBm 이상의 수신감도를 전체 무선 커버리지의 95% 이상 확보하여야 한다. 또한 빠른 열차의 이동 속도에 적합한 채널 이퀄라이저를 기지국에 추가로 설치하였다 [2]. 또한 무선통신의 가용성을 높이기 위해서 모든 통신 장비의 이중화, 네트워크 이중화, 무선 커버리지의 이중화를 수용했다. 그림 1은 GSM-R 네트워크 구조를 이중화하여 네트워크를 구성하였음을 보여준다 [3]. 2007년 TELERAIL에 의하여 네덜란드에서 처음 GSM-R이 구축된 후 (3000km), 2008년 노르웨이 (3000km), 스웨덴 (8500km), 독일 (24000km), 이탈리아 (7500km) 등에 구축되었고, 현재에도 동구권을 비롯한 유럽 전역의 철도 노선에 대하여 GSM-R 구축이 진행 중에 있다. 최종적으로 유럽 철도 노선 221,025km 노선 중 GSM-R 기반의 철도 노선을 149,673km를 (전체 67.7%) 구축할 예정이다.

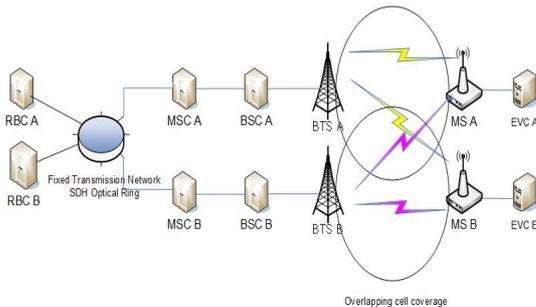


그림 1. GSM-R 네트워크 이중화 [3]

Advanced Train Administration and Communication System (ATACS)은 JR EAST (동일본철도)가 개발한 무선통신 기반 열차 제어 시스템이다. 1995년부터 설계를 시작하였고, 2001년 사양검토와 시제품 개발을 시작하였다. JR EAST는 열차 운행의 안전과 신뢰성을 확보하기 위하여 GSM-R 처럼 철도 전용 주파수 확보를 위하여 노력하였지만, 400MHz 대역의 아주 좁은 대역폭만을 정부로부터 주파수를 부여 받았다. 통신 접속 방식은 GSM-R과 유사한 Time Division Multiple Access (TDMA)를 사용하며, 주파수 대역폭은 6.25 kHz 대역폭을 활용한다. 6.25 kHz 대역폭을 총 16

개의 slot으로 분류하고 4개의 slot은 시스템 제어 용으로 사용, 12개의 slot을 이용하여 한 셀내에서 12대의 열차를 제어할 수 있다. 주요 특징으로는 열차 차상에서 열차간 간격제어, 열차의 위치 검지, 열차 속도 제어, 역구내 연동제어, 건널목 제어, 보수작업자의 안전 제어, 시스템 관리 기능, 무선 전송제어 등을 지원한다. 매우 작은 대역폭으로 인하여 관제 음성 통신은 다른 통신 수단을 이용하고 ATACS는 오직 열차 제어용으로만 사용한다. 기지국간 핸드오버는 수신 전계 강도 기반이 아닌 열차의 특정 위치에서 강제적으로 수행하며, 9.6kbps 열차 제어 정보를 1초에 한 번씩 송신한다. 이때 3번 연속 송수신이 실패할 경우, 비상 제동을 수행한다. 라디오 커버리는 일반적으로 약 3km 정도이며, 설계상 일정 수준 이상의 전계 강도가 모든 노선의 100%를 커버해야 하며, 전 노선에서 전송 프레임 수신율은 최소 99.9% 이상이 되어야 한다.

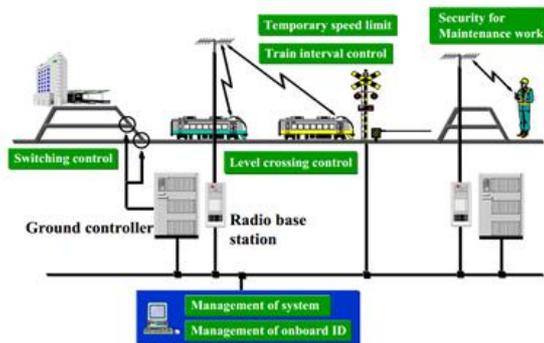


그림 2. ATACS 열차제어 시스템 [4]

현재 JR EAST에서는 단 하나의 노선만을 ATACS 기반으로 운행 중에 있다. 해당 노선은 센다이와 시노가마를 잇는 18km 선로의 센세기 라인이다. 센세기 라인에는 4개의 컨트롤 센터, 8개의 기지국, 기관차 20량으로 2011년부터 시범 운행 중에 있다. 무선 통신에 의한 10초 이상 장애가 일어날 확률은 6개월에 한번 정도로 알려져 있다.

Advanced Train Control System (ATCS)는 열차 통제 데이터 처리, 원격 모니터링, 원격 실행 등을 수행할 수 있는 미국형 열차 제어 시스템이다. 그러나 일부 철도 운영사에 의하여 각기 다른 수준으로 시스템이 구축 운영되어 상호 운영상의 문제가 발생하였고, 무선 기지국 가격도 비싸며, 노후되었다. 2008년 9월 미국 Catsworth 열차 사고로 인하여 135명의 인명손실이 발생한 이후 미국 의회는 Rail Safety Bill 법안을 제정하고 2015년까지 국가 철도 통신 네트워크를 Positive Train Control (PTC)로 의무 장착하도록 법제화 하였으나, 과도한 비용으로 인한 사업자 반발로 인하여 2018년 12월까지 장착 기한을 연기한 상태이다.

PTC의 주요 특징은 GPS와 연동되어 사고 요인을 무선망을 통하여 감시하고 열차를 제동하는 충

돌 방지 기능을 갖추었다. PTC는 음성통화 부분이 제외된 무선통신 기술 기반 열차 자동제어 시스템으로 4개의 철도사업자가 220MHz 주파수 대역 이용에 합의하여 사용 중이며, 최대 180km/h 이하의 속도에서 운영된다. PTC는 4개의 주요 파트로 구성되어 있다. Train Management and Dispatch System (TMDS) 은 열차와 관련된 각종 정보를 취합하고 명령, 통제를 수행하는 중앙 관제 시스템이다. 무선 통신 시스템은 열차와 선로장치간 양방향 무선통신 송수신을 담당한다. 선로 전환 장치는 열차와 무선통신을 통하여 선로 무결성, 교차로 안전, 선로 전환 정보, 작업자 보호 정보 등을 송수신하고 차상 장치는 GPS로 받은 위치 정보를 리포팅하고 열차 운행 명령과 정지명령을 수신 받을 수 있다. PTC의 대표적 기능은 열차 충돌, 열차 분리 방지, 선로 최고 속도 제어, 일시적 열차 속도 제어, 선로 종사자 작업 안전 제공이다.

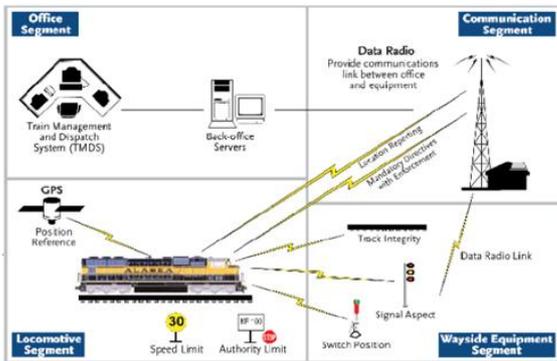


그림 3. PTC 열차제어시스템 [5]

Amtrack 철도운영 사업자의 2018년 PTC 구축현황을 살펴보면, 모든 기관차의 86%, 선로 장치 73%, 기지국 87% 등이 설치가 완료 되었고 95%의 종업원들은 이미 PTC 관련 교육을 이수하였으며, 현재 전체 노선 중 67% 정도가 실제 PTC 시스템 기반으로 운행 중에 있다.

III. 열차제어 무선통신 요구사항

열차제어용 무선통신은 열차제어신호 전송을 위하여 지상의 열차제어센터와 (Radio Block Center) 차상의 열차제어장치간 (On-board Unit) 데이터 베어러 서비스가 가능하여야 한다. 또한 열차 제어신호는 열차 운행에 핵심적인 중요 데이터임에 따라 무선통신 시스템은 데이터 전송에 가장 안정적인 베어러 설정을 수행하여야 하며, 호처리 (Call Process)는 가장 높은 순위의 호접속을 수행하여야 한다.

열차제어 무선통신 시스템에서 요구되는 Quality of Service (QoS) 파라미터는 아래와 같이 정의되고 네트워크의 상태와 부하와 무관하게 제공되어야 한다 [6].

연결 설정 지연 시간은 차상 혹은 기지국에서 연결 설정 요청을 수행하고 성공적인 연결 설정이 마무리된 시간까지의 간격을 의미한다. 차상 장치에서 진행된 호처리에서 연결설정 지연은 < 8.5s (95%), ≤ 10s (100%) 이어야 한다. 10초 이상의 연결 설정 지연은 연결 설정 실패로 간주한다.

연결설정 오류율은 무선통신 시스템에서 연결 설정 실패수를 연결설정 시도수로 나눈 비율을 의미한다. 차상에서 시도한 연결 설정 오류율은 < 10⁻² 이어야 한다.

전달 지연 시간은 송신단의 사용자 데이터 블록의 전송요청으로부터 수신단의 사용자 데이터 블록이 성공적 전달이 완료된 시점까지 시간을 의미한다. 열차제어 신호 30 바이트에 해당하는 사용자 데이터 블록의 전달 지연시간은 ≤ 0.5s (99%) 이어야 한다.

접속 손실율은 특정 시간동안 의도치 않게 통신 연결이 해제되는 경우의 수를 의미한다. 만약 연결 설정 오류율이 < 10⁻² 일 경우 접속 손실율은 < 10⁻²/h 이어야 한다.

전송 간섭 시간은 통신 장애로 인하여 사용자 데이터 전송이 불가능한 시간을 의미한다. 전송 간섭 시간은 < 0.8s (95%) 이고 < 1s (99%) 이다

에러 자유 시간은 전송 혹은 접속 장애가 발생한 후, 이를 극복하기 위한 재전송과 재접속이 이루어지기까지 시간을 의미한다. 95%에 해당되는 데이터에 대하여 20초 이상 지원해야 하면, 99%에 해당되는 데이터에 대하여 7초 이상 지원해야 한다.

표 1. 열차제어 철도무선통신 요구사항

| 요구사항항목 | 요구값 | 확률 |
|----------|-----------------------|------|
| 연결설정지연시간 | < 8.5s | 95% |
| | ≤ 10s | 100% |
| 연결설정오류율 | < 10 ⁻² | - |
| 전달지연시간 | ≤ 0.5s | 99% |
| 접속손실율 | < 10 ⁻² /h | - |
| | < 1s | 99% |
| 전송간섭시간 | < 0.8s | 95% |
| | < 1s | 99% |
| 에러자유시간 | ≥ 20s | 95% |
| | ≥ 7s | 99% |
| 등록지연시간 | ≤ 30s | 95% |
| | ≤ 35s | 99% |
| 핸드오버성공율 | ≥ 99.5% | - |
| 네트워크가용성 | ≥ 99.9984% | - |

네트워크 등록 지연시간은 철도통신 네트워크에서 사용자 등록을 요청하고 네트워크에서 단말의 사용자 등록을 허가하는 응답이 단말에 도착할 때까지의 시간을 의미한다. 95%에 해당하는 이벤트에 대해서 30s 내에 등록을 완료하여야 하며, 99% 해당하는 이벤트에 대하여 35s 내에 등록을

완료하여야 한다. 40s 가 넘어가면 네트워크 등록 실패로 간주한다.

핸드오버 성공률은 철도 무선 통신 네트워크에서 단말이 기지국 변경 과정을 통신 장애 없이 성공적으로 수행하는 확률을 의미한다. 철도 무선 통신 네트워크에서 단말의 핸드오버 성공률은 최소 99.5% 이상 되어야 한다 [7].

네트워크 가용성은 유무선을 통합한 철도 통신 네트워크에서 하드웨어 장비 혹은 통신의 장애 없이 원활하게 시스템이 동작될 수 있는 시간의 비율을 의미한다. 일반적으로 성공적 운영시간/전체 시간으로 표현한다. 열차 제어를 위한 철도 통신에선 네트워크 장비와 통신 장애로 인한 네트워크 가용성은 0.999984 이상 되어야 한다 [8].

IV. 결 론

본 논문에서는 최근 많은 연구가 되고 있는 이동통신 기반 열차제어 시스템의 기술과 무선통신 시스템의 실제 구축 사례에 대하여 설명하였다. 특히 유럽의 GSM-R, 일본의 ATACS, 미국의 PTC 열차제어 시스템의 무선통신 특징과 운영현황에 대하여 언급하였다. 각각의 이동통신 기반 열차제어 시스템의 요구사항을 분석하여 안전적 열차 운영을 위한 최소 요구 사항을 도출하였다. 이러한 요구사항을 기반으로 향후 개발될 예정인 이동통신 기반 열차제어 시스템의 안정성과 가용성을 높이는데 활용할 수 있을 것이라 기대한다.

Acknowledgement

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 “ETCS L3 열차제어시스템 (18RTRP-B145983-01)” 연구비 지원을 받아 작성하였습니다.

References

- [1] 김사혁 (2012) 국가 철도전용 통합 무선망 구축방안 및 효과 분석, 정보통신정책연구원 보고서
- [2] Siemens (1999) GSM-R The Railways Integrated Mobile Communication System, Report.
- [3] 윤병식 외 5인 (2013) 차세대 철도 통합 무선망 기술 및 표준화 동향, 한국철도학회논문집, 제 16권, 제 6호, pp. 519-527
- [4] [https://uic.org/cdrom/2009/01_ERTMS plat form/docs/6.../3.../6.../D1-hattori.pdf](https://uic.org/cdrom/2009/01_ERTMS_plat_form/docs/6.../3.../6.../D1-hattori.pdf)
- [5] <https://olivermcgee.org/positive-train-control-technology-stops-train-crashes-derailments/>
- [6] ERMTS/ETCS - Class 1 “GSM-R Interface Class 1 Requirements” SUBSET-093
- [7] ETSI TR 103 134 “Railway Telecommunications (RT); GSM-R in support of EC Mandate M/486 En on Urban Rail
- [8] ERMTS/ETCS RAMS Requirements Specification : EEIG:96S126