

무선통신기반 열차제어에 의한 무인운전기술에 대한 연구

정락교^{1*}, 김백현¹

¹한국철도기술연구원 열차제어통신연구실

A Study on the Drive-less Operating Technology using Communication Based Train Control

Jeong Rag-gyo^{1*} and Kim Baek-hyun¹

¹Train Control & Communication Research Department, Korea Railroad Research Institute

요약 본 논문에서는 기존의 궤도회로(Track Circuit)를 이용하는 FBS의 설비측면에서 단락감도 및 선로변 설비(지상설비)의 규모에 따른 유지보수의 증가 등의 문제점을 극복하고, 차량간 간격을 근접시키기 위한 열차제어 개념인 MBS의 구현에 따른 무인운전기술의 가능성을 검증하였다. MBS에 의한 열차 운전은 중앙국에서 열차의 위치를 실시간으로 알 수 있어 선행열차의 정보를 후속열차에 직접 전달할 수 있으므로 시격(Headway)단축이 가능해지고 그에 따라 수송수요 증대와 불필요한 가감속을 방지할 수 있다. 이와 더불어 지상설비를 대폭적으로 감소시킬 수 있으며, 승객서비스 향상 및 승차감 향상 등의 이점을 제공한다.

Abstract In this paper, we verify the driverless operation possibility of MBS, which could overcome the defects of conventional track-circuit-based FBS, such as additional needs of maintenance and others problems according to short-circuit sensibility and, and which could allow the minimal interval between trains. With MBS, we can expect the reduction of headway, then the increase of transportation demand, and the protection of unnecessary speed variation because it allows the real time detection of train position from central office, and direct transmission of data between preceding trains and the following ones. In addition, it is possible to reduce the number of wayside-equipment substantially, to improve the passenger service, and to the achieve the positive economic effects by comfortable ride.

Key Words : MBS(Moving Block System), Driverless operation, Train Control, Headway

1. 서론

철도시스템의 주요 구성요소 중의 하나인 신호시스템 기술이 발전할수록 고속, 정시성, 대량수송 및 러시아워(Rush-hour)의 수송수요에 대한 대응의 유효성으로 시격의 단축방안이 더욱 부각되고 있으며, 무선통신 기술의 발달에 힘입어 철도시스템 분야에 상당히 적용되고 있다. 안전과 관련한 열차운전보안에 관계되는 신호시스템 하부 장치의 무선통신 기술적용은 페일-세이프(Fail-safe)의 확보가 어렵기 때문에 일부분에 한정되어 있다. 그러나, 신호시스템에 무선기술을 적용하여 이동 폐색을 구현하

여 위치 추적을 하면 선로변 지상설비에 소요되는 비용 및 유지보수 비용측면에서 경제적이며 저비용으로 간격 제어의 실현이 가능하다[1-4].

무선통신에 의한 이동체의 위치 추적방법은 크게 두 가지로 분류되는데 이동국 자체적으로 위치를 추적하는 방식과 기지국에서 위치를 추적하는 방식으로 나눌 수 있다. 이동국 자체적으로 위치를 추적하는 방법으로는 GPS 및 Loran-C를 이용한 방법이 있으며, 측정된 위치정보를 기지국에 알려 줄 수 있다. 또한 기지국에서 위치를 추적하는 방식으로 TOA(Time of Arrival), TDOA(Time Difference of Arrival)와 같이 수신 시간을 측정하여 위치

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업 “승객여정선택형 대중교통(PRT) 운영기술개발” 연구과제로 수행되었음.

*교신저자 : 정락교(rgjeong@krii.re.kr)

접수일 09년 08월 28일

수정일 (1차 09년 12월 24일, 2차 10년 01월 07일)

게재확정일 10년 01월 20일

를 추적하는 방법, AOA(Angle of Arrival)와 같이 수신 방향을 검지하여 위치를 추적하는 방법 및 신호의 세기를 측정하는 방법 등이 있으며, 정확도를 높이기 위하여 많은 변형된 방법을 이용하여 독립적으로 혹은 복합적으로 사용되어지며, 이동국에서 어떤 변환이나 특별한 장치가 필요 없다[5].

이러한 추적방법을 이용한 시스템은 다수의 기지국과 수신기 사이의 전파도달시간을 측정함으로써 거리를 측정하는 기하학적인 방법에 의하여 위치추적을 가능하게 한다. 전송되는 신호의 주파수 변화를 측정할 수 있는 위치 추적시스템으로서 도플러 장치는 기지국 혹은 이동국이 이동할 때 수신되는 신호를 도플러 편이와 연관된다.

이들 이동체 위치를 추적할 수 있는 많은 기술들이 철도에 적용이 시도되고 있다. 철도에 있어서 열차의 위치 추적은 전기적으로 궤도회로를 구성하여 그로부터 안전 및 열차 제어의 기반을 마련하였으며, 열차가 정지하기 위한 폐색 구분, 제동거리 확보를 토대로 안전제동거리 및 수송력 증대를 도모하여 Distance-to-Go라는 시스템에 도달하였으나, 이제 더 이상 궤도회로를 근간으로 한 시스템은 한계에 도달하였다. 따라서 실시간 정보를 주고받을 수 있음으로써 비용 및 고밀도 운전을 할 수 있는 이동폐색 시스템(Moving Block System : MBS)이 요구되었고 이를 구현하기 위하여 실시간으로 열차의 위치를 알 수 있는 무선통신에 의한 열차제어(Communication Based Train Control : CBTC)가 기본방향 및 목표로 제시되고 있다[6].

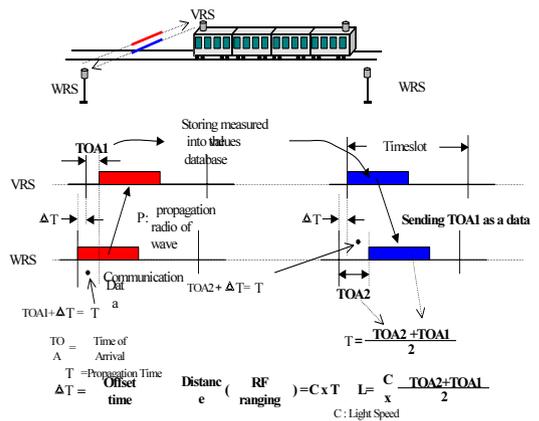
열차의 간격제어를 위해서는 열차의 위치 파악이 필수적이므로 기지국(지상국)-이동국(열차/차량)간 전파지연 시간, GPS 등의 위치추적 방법을 적용하여 선행열차의 정보를 후속열차에 직접 전달하여 MBS를 구현할 수 있다. 기존의 궤도회로(Track Circuit)를 이용하는 FBS(Fixed Block System)는 설비측면에서 단락감도를 고려하여야 하고 선로변 설비(지상설비)의 규모가 크고 많으며, 그에 따른 유지보수의 증가에 따른 어려움 등의 문제점이 있다. 이들 문제점을 극복할 수 있는 대안으로 MBS가 도출되었다. MBS에 의한 열차 운전은 중앙국에서 열차의 위치를 실시간으로 알 수 있어 선행열차의 정보를 후속열차에 직접 전달할 수 있으므로 시격(Headway)단축이 가능해지고 그에 따라 수송수요 증대와 불필요한 가감속을 방지할 수 있다. 또한 선로 용량증가 및 선로변 설비의 대폭 축소, 승차감 향상을 통한 경제적 효과, 승객서비스 향상을 도모할 수 있는 이점을 갖고 있어 이를 구현하기 위한 활발한 연구가 진행되고 있다[7,8]. 또한 열차의 위치 결정에 따라 열차의 운전에 필수적인 추진 및 제동 기능 구현이 가능해진다.

현재까지는 TOA응용으로 지상국에서 이동국으로 정보를 보낼 때 정보가 도착한 시간에서 정보가 보내진 시간의 차로써 전파시간을 구하는 방식으로 거리를 측정하는 것으로서 이때 정보는 매 0.5[sec] 간격으로 전송된다. 이 방식은 클럭을 동기 시키기가 어려운 점이 있으나, 열차 위치 추적을 ±4.5[m]로 정확히 할 수 있는 장점이 있어, 신뢰성을 향상시키기 위한 연구를 수행하고 있다 [9-12]. 본 논문에서는 기존의 TOA응용을 적용하여 시스템의 무인운전과 연계·적용하여 무인운전 기능을 구현함으로써 적용성을 검증하였다.

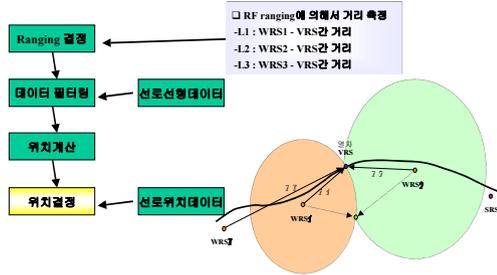
2. 시스템개념 및 주요사양

2.1 위치검출개념 및 주요사양

CBTC 신호시스템을 운영측면에서 검토했을 때 필요한 안전성, 신뢰성 및 효율성을 충족시킬 수 있는 요구사항을 도출하였다. ① 궤도회로와 상관없이 고정밀도의 열차 위치를 결정한다. ② 연속적이며, 양방향성 차상-지상간 무선 데이터 통신을 수행한다. ③ 차상 및 지상 장치에는 바이탈 기능이 있다. 아울러 자동 무인운전에서 필요조건으로는 “① 무인운전이기 때문에 통상, 운전사가 조작할 필요가 있는 차량기기를 지령실에서 원격 조작한다. ② 운전사가 각종 조작을 위해 필요한 차량기기의 표시를 지령실에 전송한다.”이며, 운전대의 조건은 위치(방향)조건, 운전모드 스위치 조건, 비상브레이크 취급 조건, ATO 출발 조건 등을 명확히 설정하여야 한다.



[그림 1] TOA에 의한 열차 위치검지 개념도



[그림 2] TOA에 의한 열차 위치 결정도

이를 바탕으로 시스템 기본사항을 각 하부 시스템인 ATP(Automatic Train Control Protection), ATO(Automatic Train Operation), ATS(Automatic Train Supervision)로 구분하여 기능을 설정하였으며, TOA(Time of Arrival)는 전파통신을 기초로 한 방법으로 차량에 부착되어 있는 이동국과 지상에 고정되어 있는 지상국간 통신을 통해 차량의 위치를 감지하고 그 정보를 계산하여 사용하는 방법으로 그림 1, 2에서 감지 및 결정하는 방법을 나타내었다[12].

표 1에서는 TOA기반 CBTC의 통신 주요 성능사항을 나타내고 있으며, 본 사양에 의거하여 시험방안을 수립하고 상호 연계성을 시험을 통해 알아보아야 한다. 개발시스템의 검증절차에 따라 시험선에 설치되어 있는 시스템의 각 H/W에 대한 성능평가 시험시 안전을 확보하기 위한 물리적인 대책이 강구되어야 한다.

[표 1] TOA기반 CBTC의 통신 주요 성능사항

항 목	성능 사양
다중통신방식	CDMA, FDMA, TDMA
사용주파수	2423.75MHz ~ 2462.75MHz
채널수	32개 채널(1MHz 간격)
사용대역폭	3MHz/1ch
송신출력	500mW/1ch
1개 제어구간에서의 제어가능열차	10 ~ 20 열차
열차위치감지 정밀도	±5.0m ~ ±10m
열차속도 정밀도	±1km/h ~ ±5km/h
열차제어속도 스텝	±0.5km/h ~ ±5km/h
무선통신응답시간	표준 0.5초
인터페이스	RS 485, EISA net

개발시스템에 대한 검증절차로서 무선주파수 할당 관련한 사항은 전파법에 의해, 신고/허가절차에 따라 수행할 사항이며, 이를 근거로 한 시스템 검지를 위한 절차는 별도의 시험평가 체계 속에서 이루어질 것이다. 이를 시

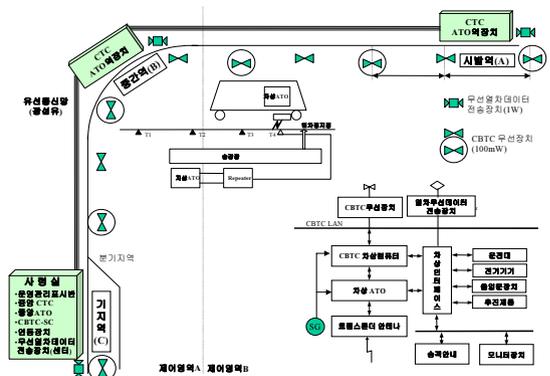
험평가하기 위한 시험조건으로는 각 하부 시스템별 주요 시스템 사양은 표 2와 같다.

[표 2] 적용차량시스템의 주요사항

구분	주요사항	사양 내용
시스템 (운전방식)	본선 및 측선 일부	자동열차운전(무인)
	측선 일부	수동운전
차 량	편성	2량 고정 1편성(고무차륜 AGT)
	안내 방식	측방 안내
	조향방식	보기 방식
	주행륜	고무타이어
	분기 방식	좌우가동분기
	추진제어 방식	VVVF 제어
	성능	가속도
감속도(상용)		3.5km/h/s
감속도(비상)		4.5km/h/s
최고 운전속도	60km/h	
전 력	가선 전압	DC 750V
	전원공급 방식	제3궤조 방식
선 로	노선 연장	1km
	역사 수	3
	최급 구배	-본선 : 5%, -측선 : 58%
	최소곡선 반경	-본선 : 100m, -측선 : 30m

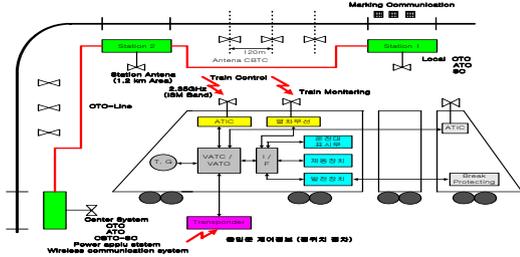
2.2 시험선 설계

시험선 선형에 위치 감지결정을 위한 신호제어시스템의 선로변 및 역사에 설치할 H/W장치를 그림 3에 나타내었다.



[그림 3] 신호제어시스템 배치도

또한 CBTC 시스템을 차상과 지상, 역사의 CBTC로 구분하여 각 장치간의 연결과 통신 구성을 그림 4에 도식적으로 나타내었다.



[그림 4] CBTC 시스템 구성

CBTC 역컴퓨터에서 속도제어지령 등의 정보를 수신하고, 속도센서(TG)의 정보와 비교하여 열차가 안전한 속도로 주행하고 있는가 속도검사를 한다. 속도를 초과한 것으로 판정되었을 때는 제동제어지령을 제동제어장치에 출력한다. CBTC차상컴퓨터는 수동운전 시에 필요한 차내 속도신호를 운전대에 표시한다. 또한 원하지 않는 열차의 후진을 감지하면 제동제어지령을 제동제어장치에 출력한다. VRS(Vehicle Radio Set)는 열차의 선두 및 후미차량의 지붕에 설치되는 무선기이며 WRS(Wayside Radio Set)/SRS(Station Radio Set)와 통신을 한다. 그리고 ATIC(ATC Train Interface Controller)장치는 CBTC차상장치와 VRS간 인터페이스를 하는 장치로서 VRS 근방에 설치된다.

ATO지상자로부터 정보를 수신하여 정위치 정지패턴 생성과 거리보정을 한다. 정위치 정지패턴을 판정하여 가감속도지령을 차량의 구동장치에 출력한다. ATO차상컴퓨터가 논리처리를 한 결과 제동제어가 필요한 경우는 제동지령을 제동제어장치에 출력한다.

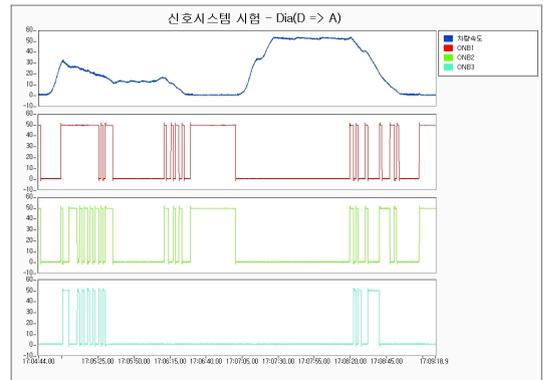
3. 시험 결과

본 시험은 무인모드(ATO무인)로 수행하였으며 시험선의 D역을 출발하여, B역, A역을 도착역으로 하여, 각각의 역에서는 3-5초간 정차하여 통상운행패턴으로 운전하여 차상 CBTC에서의 신호를 계속하였다.

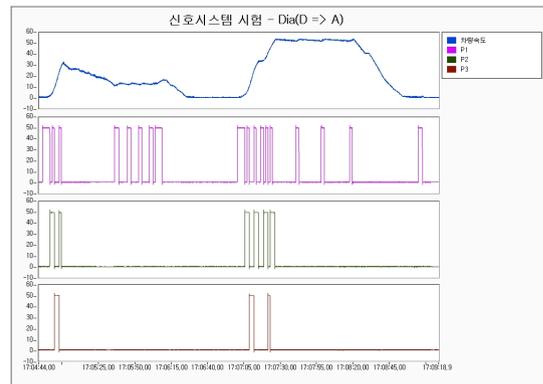
무인운전을 위해서는 출발제어에서부터 1초 간격으로 N-P1-P2-P3로 중립노치(N)에서 추진노치(P1, P2, P3)가 일단씩 노치(Notch) 제어가 이루어지며, 정속주행(타행/완화), 하행, 분기제어 등과 정위치 정지를 위한 정점 정지제어에 이르기까지 지상자(P1)를 수신하면 P0 지상자

를 정지점으로 하여 $\beta = 1 = \beta a / \text{제동노치수}$ 로 실감속도(βa)를 현재의 제동노치수로 나누어, 1노치 단위의 감속도(β)를 구하여 정위치 정지함을 그림 5~7에 나타내었다. 시험선의 역을 D-B-A의 운행 다이어에 따라 운행하면서 정상적인 기능 수행여부를 확인하기 위한 시험으로 세로축은 속도, 가로축은 시간을 의미한다. 제동신호에 따른 제동노치(B1, B2, B3)에 해당하는 제동코드를 차량 제어장치에 전송하여 제동지령으로 사용됨을 그림 5에 나타내었으며, 그림 6은 추진 제어장치 신호에 따라 역행노치(P1, P2, P3)에 해당하는 역행코드를 차량제어장치에 전송하여 역행지령으로 사용됨을 나타낸 것이다. 그림 7은 마스터 핸들(Master Handle)제어로서 제동/추진 제어장치 제어노치 신호를 생성하는 제어기 인터페이스를 나타낸 것이다.

3.1 무인모드(ATO 무인)



[그림 5] CBTC 제동 신호

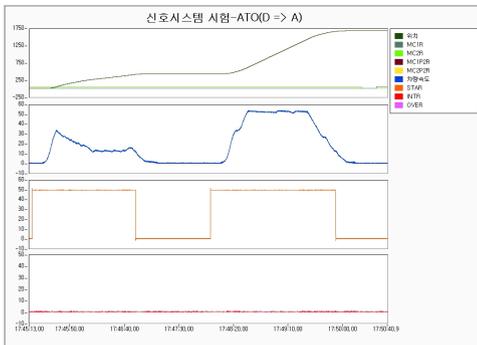


[그림 6] CBTC 역행 신호

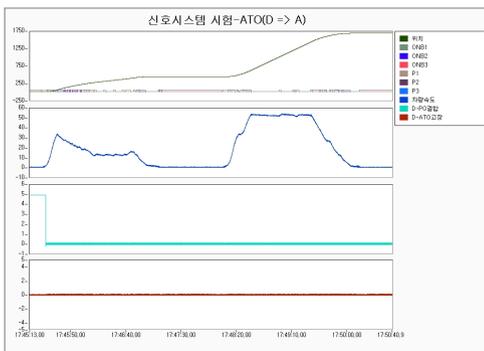


[그림 7] CBTC Master Handle 제어 신호

3.2 자동모드(ATO 유인)



[그림 8] 출발허가, 인칭/오버런



[그림 9] 시험선 D역 정차 신호

시험선의 역을 D-B-A의 운행 다이어(자동모드)에 따라 운행하면서 정상적인 기능 수행여부를 확인하기 위한 시험으로 그림 8에서는 자동모드에서 출발허가와 인칭 상태를 나타낸 것으로 세부적으로는 위치, 속도, 출발허

가, 인칭을 나타낸 것이며, 그림 9에는 정위치 정지를 위한 점정제어과정으로 지상자를 수신하여 P0 지상자결합 과정에서 인자들의 동작 상태를 나타내었다. 그림 5~7 과 그림 8, 9는 동일노선 및 조건에서 무인/자동모드상태로 운행 다이어에서 일련의 기능을 확인한 것이다.

4. 결론

세계최초로 TOA 기반의 위치검출방식으로 무인운전을 구현하였다. 안전과 관련한 열차운전보안에 관계되는 신호시스템 하부 장치의 무선 기술적용은 페일-세이프(Fail-safe)의 확보가 어렵기 때문에 일부분에 한정되어 있다. 그러나 신호시스템에 무선기술을 적용하여 이동 폐색을 구현하여 위치 추적을 하면 선로변 지상설비에 소요되는 비용 및 유지보수 비용측면에서 경제적이며 저비용으로 간격제어의 실현이 가능함과 각 주행 운전 모드별(자동, 수동 등)뿐만 아니라 무인운전에 필요한 자동출발, 자동가속감속운전, 정밀정차, 출입문플랫폼도어 자동 개폐와 연계하여 운전이 가능함을 확인하였다. 더불어 차후 실용화를 위해서는 신뢰성 확보가 중요하므로 국제규격에 준하는 주행시험을 지속하여야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 鐵道における無線利用技術調査専門委員會, “鐵道における無線利用技術”, 日本電氣學會 技術報告, 第904号, 2003.
- [2] 何久律他, “IMTS用制御コンピュータ信頼性評價”, 日本電氣學會 交通電氣鐵道研究會, TER-01-38, July 2001.
- [3] David Norris and Stefan Axelsson, "Cost Effective Signalling for Secondary Lines", SIGNAL + DRAFT, April 1999.
- [4] Holm Hofestard Kraftschik and Peter Straubler, "SIMIS FFB from Siemens for the German Railway", SIGNAL + DRAFT, April 1999.
- [5] J. C. Liberti and T. S. Rappaport, "Smart Antennas for Wireless Communication", Prentice-Hall, 1999.
- [6] IEEE, Communications Based Train Control(CBTC) Performance and Functional Requirements, IEEE Std 1474.1, September 1999.
- [7] 정락교, 김영석, “경량전철 목표노선의 운전시각 설정에 관한 연구” 전기학회 논문지, Vol. 35B, No. 1, pp. 8-15, 2004.

- [8] <http://www.tsd.org/Railway> Technical Web Pages
- [9] E. Nishinaga, J. A. Evans, and G. L. Mayhew, "Wireless Advanced Automatic Train Control", ASME/IEEE Joint Proceedings of the Railroad Conference, pp.31-46, March 1994.
- [10] G. L. Mayhew and D. S. Long, "Contribution of Vehicle Location Technology to Transit Headway Minimization", IEEE Vehicular Technology Conference, pp.356-359, May 1993.
- [11] G. L. Mayhew, J. A. Kivett, J. G. Himes, and J. A. Evans, "Application of Radio Navigation Technology to Advanced Automatic Train Control", IEEE Position Location and Navigation Symposium, pp.217 - 224, April 1994.
- [12] 한국철도기술연구원, 경량전철시스템기술개발사업 2004, 2005년도 보고서.
- [13] IEC 62227 "Railway Applications Automated Urban Guided Transport (AUGT) Safety Requirements(draft)", 2006.3.

김 백 현(Baek-hyun Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 인하대학교 전자공학과(공학사)
- 1996년 2월 : 인하대학교 전자공학과(공학석사)
- 2003년 2월 : 인하대학교 전자공학과(공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 열차제어통신연구실 선임연구원

<관심분야>

전기전자, 철도통신, 열차제어

정 락 교(Rag-gyo Jeong)

[정회원]



- 1991년 2월 : 인하대학교 전기공학과(공학사)
- 1999년 8월 : 인하대학교 전기공학과(공학석사)
- 2005년 2월 : 인하대학교 전기공학과(공학박사)
- 1990년 12월 ~ 1994년 12월 : 한진중공업 사원
- 1995년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 열차제어통신연구실 책임연구원

<관심분야>

전기전자, 열차제어, 시스템엔지니어링