

최근의 도시철도 신호시스템 기술에 관한 연구개발(1)

The Research and Development of the current Urban Transit Train Control System

김종기* 김용규* 이준호* 김백현* 신덕호* 이기서**
Kim, Jong Ki Kim, Yong Kyu Lee, Jun Ho Kim, Back Hyun Shin, Duck Ho Lee, Gey Seo

ABSTRACT

The signalling systems, which are currently used in Urban Transit, are mostly using track_circuit based train control systems. However, as the development of radio communication technology, the radio communication technology based train control systems (of railway systems) are developed. In addition, the relevant studies are promoted in many countries. In this paper, 'Track circuit Based Train Control 'system and 'Communication Based Train Control' system will be studied.

1. 서론

철도가 처음 생긴 1830년대에는 고정된 신호시스템이 존재하지 않음에 따라 기관사는 오로지 자신의 시각에 의존하여 차량을 운행하였다. 즉 기관사에게 전방의 선로 상황을 알려줄 수 있는 시스템이 없음에 따라 운행 측면에서 차량의 충돌을 방지하는 방법의 필요성이 대두되었다. 또한 몇 번의 불미스런 열차 사고를 통해 기관사가 가시거리 이내에서 차량을 정지시키는 것이 얼마나 어려운 일인지 확인 되었다. 특히 철도에서 짐작의 정도는 도로 위에서보다 훨씬 낮기 때문에 열차가 정지할 때는 같은 속도로 주행하는 자동차가 정지할 때보다 훨씬 더 많은 제동거리가 필요하다. 최상의 열차 운행조건이라 할지라도 기관사가 가시거리 내에서 차량을 정지시키기란 지극히 어려우며, 이는 오늘날도 마찬가지다.

이러한 현상의 해결과 운행 열차 속도의 향상 및 고밀도 열차 운행을 실현하기 위해 도시철도의 신호시스템은 대부분이 궤도회로를 기반으로 한 열차제어시스템을 사용하고 있다. 그러나 최근 무선통신의 발전에 힘입어 철도시스템에서도 무선통신기술을 기반으로 한 열차제어시스템이 연구 개발되고 있으며, 세계 각국이 이에 대한 실용화를 추진하고 있다.

본 논문에서는 국내 도시철도에서 사용중인 기존 신호시스템을 분석하고, 국내외에서 연구개발 및 실용화 중인 새로운 패러다임의 신호시스템인 통신기반열차제어시스템 등 신호시스템의 기술추이에 관하여 작성하고, 추후 국내에서 추진중인 통신기반열차제어시스템의 연구개발에 관하여 논하고자 한다.

2. 신호시스템과 열차제어시스템

신호시스템의 기본 규칙은 선로를 구간으로 나누고 한 구간에는 한 번에 한 대의 차량만을 허용하는 것을 기본 개념으로 한다. 각각의 구간(보통 폐색이라고 부름)은 구간의 입구에 설치되어 운전자에게 접근 중인 차량을 알려주는 고정 신호에 의해서 운행중인 차량은 보호된다. 만약 구간에 장애물이 없으면, 예를 들어 구간 내에 차량이 하나도 없는 경우, 신호기는 '진행' 표시를 현시한다. 초창기 영국에서는 완목을 들어 올려 진행을 표시했다. 요즘에는 녹색 불빛(철도 용어로는 '현시'라고 함)으로 대신한다. 그러나 만약 구간이 차량에 의해 점유되어 있으면 신호기는 '정지' 표시를 나타낼 것이다. 이것은 보통 적색 현시이다. 후속차량은 선행하는 차량이 구간을 완전히 빠져나갈 때까지 기다리게 된다. 이것이 모든 신호시스템이 설계되고 운영되는 기본 원리이다.

* 한국철도기술연구원, 연구원, 정회원

** 광운대학교, 교수, 정회원

도시철도의 안전운행은 운행중인 열차 상호간의 위치파악과 안전거리 확보가 가장 기본적인 요소이며, 이들 요소를 활용하여 열차진로를 안전하게 연동제어하고, 열차운행속도를 적절히 제어하여 도시철도의 운행이 안전하도록 열차제어기술발전이 진행되어 오고 있다고 볼 수 있다. 우리나라에서 사용되고 있는 도시철도 신호시스템의 시작은 일본으로부터 도입되기 시작하여 오늘에 이르고 있으며, 이들 모두 궤도회로를 기반으로한 열차속도제어기술을 기반으로 하고 있다. 따라서 본 논문에서 우리가 사용하고 있는 지금까지의 신호시스템을 궤도회로기반열차제어(TBTC:Track_circuit Based Train Control)시스템으로 정의하고자 한다. 그리고 TBTC시스템 이전의 열차제어방식을 기관사의 가시운전방식에 의존하였으므로 MBTC(Man Based Train Control)시스템 즉 인간의존적열차제어시스템이라고 정의 한다.

궤도회로는 1872년 영국의 윌리엄 로빈슨에 의해 발명되어 1910년대에 궤도회로에 의한 열차제어방식이 널리 보급되면서 오늘에 이르고 있다. 궤도회로는 레일을 전기회로의 일부로 사용하여 회로를 구성하고 그 회로를 차량의 차축에 의해 레일간을 단락함에 따라 신호장치, 선로전환기장치, 기타 보안장치를 직접 또는 간접으로 제어할 목적으로 설치되어 열차의 유무를 검지하기 위한 전기회로이다.

한편 도시내의 이동인구 증가 추세로 도시철도의 수요가 증가되는 추세에 있고, 점점 더 이동수단으로의 중요성이 증대 되고 있어 제한된 선로를 효율적으로 이용하는 방법의 모색 등 설비면에서도 단락감도에 대한 고려와 신호시스템의 지상설비 규모가 크고 유지보수의 어려움이 점차 문제점이 제기되고 있는 실정이다.

이상과 같이 최근까지 100여년 가까운 역사를 가진 궤도회로를 기반으로하는 열차제어시스템을 대신하여 무선통신을 이용한 새로운 개념의 열차제어방식이 세계 각국에서 연구와 실험이 행하여지고 있으며, 최근 국내 분당선에서도 시범설치하여 시험중에 있다. 국가에서도 도시철도 신호시스템 표준화를 위하여 지금까지 사용하고 있는 궤도회로기반열차제어방식보다 기술과 효율 등이 향상된 무선통신기반열차제어(CBTC:Communication Based Train Control)방식을 채용한 신호시스템 표준화를 추진중에 있다.

3. 국내 도시철도 신호시스템

대용량 대중교통 수단인 도시철도의 운용에 있어 중요한 역할을 수행하는 신호시스템은 인명 및 설비의 안전을 위해 열차가 위험한 상황에 직면하지 않도록 지속적인 제어, 감시, 점검 등을 지상설비와 완벽한 인터페이스 하에 수행한다. 또한 이장치의 중요한 사용목적중의 하나로, 열차편성수를 최소화하고 운전시각을 단축시켜 승객 서비스와 경제적 효과에 기여한다는 것이다.

그러기 위해서, 열차 운행의 완전 자동화로 상업운전속도 향상 및 수송수요의 급증에 유연한 대처가 필요하다. 신호시스템이 도시철도에 처음 도입된 것은 ATS(Automatic Train Stop)장치이며, 이는 지상 레일 안에 설치된 지상신호발생장치(점제어 방식)의 속도제한 신호에 의해 제한속도가 현시되어지며, 승무원이 열차의 가감속제어를 수동으로 수행한다.

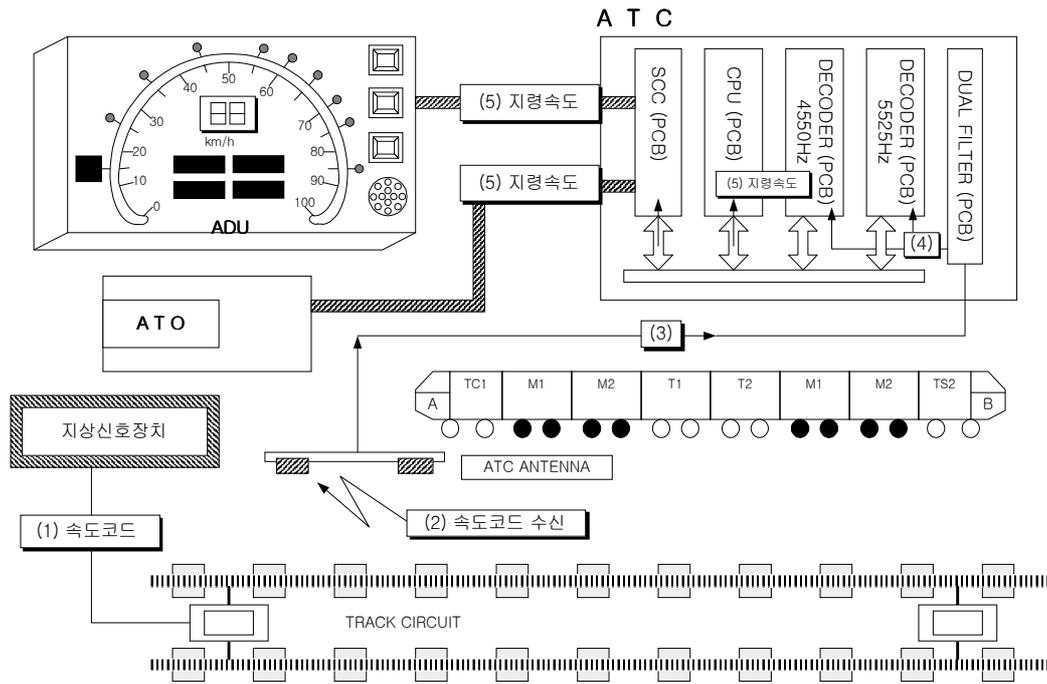
그 이후, ATC((Automatic Train Control or Continuous Speed Control)장치가 도입 되었으며, 여러 종류의 ATC시스템중 국내에 도입된 것은 속도코드방식(Speed Coded System)과 Overlay방식(Distance to go System)이 있다. ATC장치는 중앙 지상설비(CTC)가 선행 열차의 점유 상태 및 속도를 파악하여, 사전에 설정된 여러개의 속도코드중 적절한 것을 선택하여, 궤도회로를 통해 후속 열차에 전송하는 방법으로 열차의 안전운행을 지원하고 있으며, ATO기능을 추가하여 ATC/ATO시스템으로도 사용되고 있다. 또한 국내의 특수상황으로 ATC/ATS를 연합하여 도입된 시스템(과천선과 안선선)은 지상설비가 ATC구간과 ATS구간으로 구분되어 설치되므로서 두 시스템간의 인터페이스 및 절환 방법이 강구되었다. 신호시스템의 지속적인 발전을 위해서 지상설비 및 차상장치에 대한 시스템설계의 국산화가 필수적이며, 노선 이용율의 극대화, 정시운행, 완전 자동화, 운행관리 시스템의 발전, 운행 및 유지보수 비용절감 등의 측면이 최대로 고려된 설계를 지향해야 할 것이다.

4. TBTC시스템과 CBTC시스템의 비교

궤도회로를 이용한 열차제어시스템(TBTC시스템)은 지상의 거점에 위치하는 제어장치가 각 열차의 위치정보를 주기적으로 수집하고, 선행열차와 속도제한 지점까지의 거리(간격)을 고려하여 제한속도 정보

를 차상으로 전송하고, 차상의 제어장치는 열차의 속도를 인지하여 최적의 속도제어를 하는 것으로, 지상과 차상간의 데이터 전송에 궤도회로를 사용하는 것이다.

TBTC시스템에는 속도코드방식과 Overlay 방식으로 대별되며, 속도코드방식은 1960년대에 출시된 연속속도제어 시스템으로서 고정폐색방식을 원리로 한 것이다. 전노선을 여러개의 폐색구간으로 분할하여, 각각의 폐색구간마다 궤도회로를 설치하여 이에 제한속도를 부여한 것이다. 이는 궤도회로의 수량이 많을수록, 즉 폐색구간의 길이가 짧을수록 성능이 향상된다. 그림1은 속도코드방식의 신호시스템 구성의 예로서 서울2기 지하철의 신호시스템의 속도코드 전달경로를 분석한 것이다.



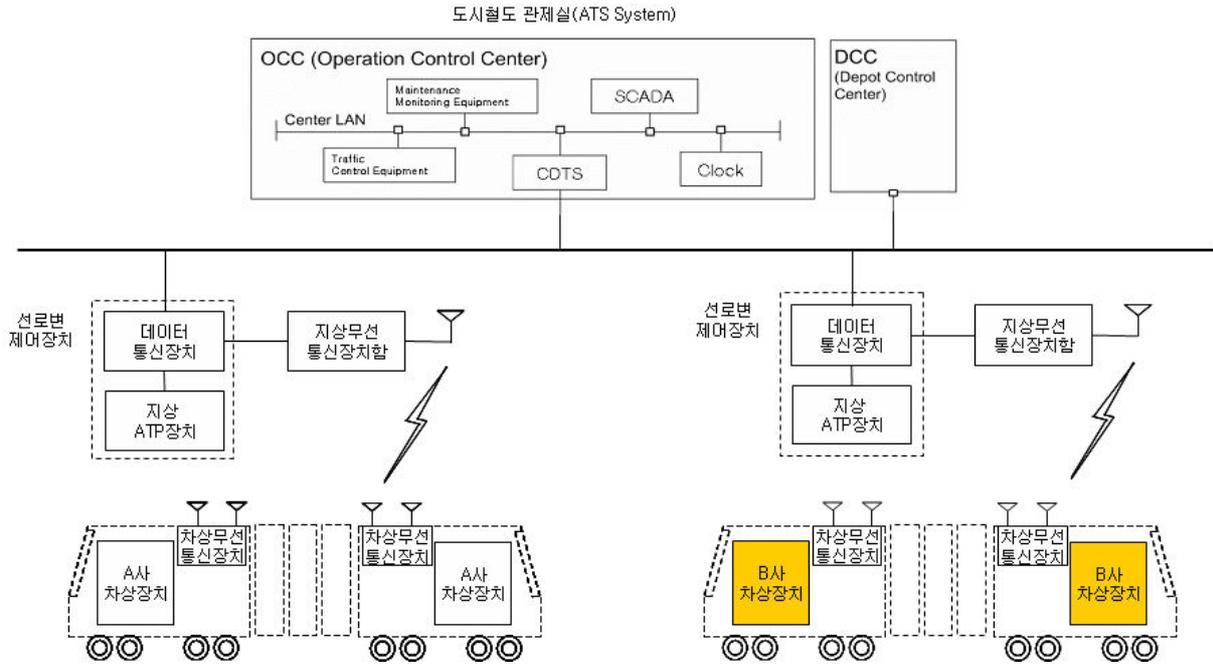
<그림1. 속도코드방식의 시스템 구성(예)>

Overlay 방식(Distance to go System)은 1980년 대 후반에 출시되었으며 고정폐색 방식을 원리로 한 것으로, 운전시각의 단축 및 궤도회로의 절감을 위해 개발된 것이다. 기존의 속도코드방식은 지상설비에서 속도패턴을 선정하여 차상설비로 전송하여 열차를 운전하는데 비해, 이 방식은 차상설비가 지상설비로부터 선행열차의 위치 및 전방궤도의 지리적 특성을 수신하여 열차 스스로가 실시간적으로 열차 자신의 속도를 설정할 수 있도록한 시스템이다. 즉, 기존 시스템의 개념에 이동폐색방식의 개념을 도입한 것으로서, 노선에 투입된 각종 열차의 특성을 충분히 발휘 할 수 있게 한 것이다.

무선을 이용한 열차제어시스템, 즉 CBTC 시스템은 지상의 거점에 위치하는 컴퓨터가 각 열차로부터 위치와 속도를 주기적으로 수집하고, 선행열차와 속도 제한 지점까지의 거리를 열차로 전송하고, 차상의 제어장치가 열차성능에 맞는 최적의 속도제어를 하는 것으로, 지상과 차상간의 데이터 전송에 무선을 사용하는 것이다. 이 방식은 기존의 궤도회로를 이용하지 않으므로 일명 Track Circuit Interface Free System이라고도 하며, 이동폐색방식을 기반으로 하고 있다. 이 시스템은 1990년대 초에 개발된 것으로서, 기존의 고정폐색방식이 폐색구간의 길이에 의해 열차간의 간격이 제한 받는 점을 보완하기 위해 개발한 것이다. 즉, 전방 열차의 정확한 위치를 후속열차가 파악하여 열차자신의 속도에 따라 전방의 제동 거리를 스스로 판단하는 시스템이다. 운전시각을 단축하는데 있어 차상설비에 의한 실시간 제어가 가장 효과적인 것으로 판명되고 있다. 본 방식의 열차제어시스템 제품개발이 세계적인 추세이며, 향후 전세계 지하철에는 도입이 증대될 것으로 전망된다.

참고로 노선상 열차를 충돌함이 없이 안전하고 신속하게 운행하기 위해서 열차와 열차사이에는 항상

일정한 간격이 확보되어야 한다. 이와 같이 열차간에 일정한 간격을 유지하기 위해, 폐색구간을 설정하여 한 개의 폐색구간에 한 편성의 열차만 운행할 수 있도록 한 것을 고정폐색방식(Fixed Block System)이라한다. 반면 이동폐색방식(Moving Block System)이라함은 선형열차의 위치, 속도 등의 신호상태를 후속열차가 지상설비로부터 수신하여, 열차 스스로가 자신의 주행속도를 계산하여 전방열차와의 안전거리를 확보하는 방식을 말한다. 따라서 TBTC시스템은 고정폐색방식을, CBTC시스템은 이동폐색방식을 사용하여 열차를 제어하는 신호시스템으로 보아도 무방할 것이다. 그림2는 CBTC System의 구성예이다.



<그림2. CBTC System의 구성(예)>

표1의 내용은 TBTC시스템과 CBTC시스템의 사용폐색의 형태 등 각종 특성에 관한 비교표이다.

<표 1. TBTC시스템과 CBTC시스템의 비교표>

구분	TBTC		CBTC
	Speed Code System	Overlay System (Distance to go)	Track Circuit I/F Free System
사용 폐색의 형태	고정폐색	고정폐색	이동폐색
전송매체	궤도회로	Rail, Cable, Radio	Cable 또는 Radio
열차의 검지 방법	궤도회로	궤도회로	무선통신
차상에서의 열차위치과악	No	Yes	Yes
Speed Profile의 생성	지상설비	차상설비	차상설비
속도제어(V열차<Vmax의 확인)	차상설비	차상설비	차상설비
궤도에서 열차로의 정보내용	Speed Code	궤도에 관한 정보 및 궤도의 점유상태	궤도에 관한 정보 및 열차의 위치
양방향통신	No	No	Yes
이용율 변수	궤도회로 신뢰성에 좌우	궤도회로 신뢰성에 좌우	통신의 신뢰성에 좌우
기술의 쇠퇴 가능성	높음	낮음	낮음
기존신호에의 Overlay 가능성	불가	가능	가능
이종류의 열차를 운행시 열차의 성능	성능이 가장 낮은 열차의 특성을 기준	최적화	최적화

5. 신호시스템의 기술추이

앞에서 검토한 신호시스템의 열차속도제어 관점에서의 기술개발추이를 철도의 초창기부터 정리하고자 한다. 철도 초기에는 안전운전에 대한 사고(思考)는 매우 단순하여 지금까지 도로를 주행하던 마차교통이 레일 위를 기관차가 차량을 견인하는 기차교통(철도)으로 변한 것에 불과하다고 생각하였으므로 특별한 안전시스템을 채용하려고 하지 않았다고 한다. 당시 열차는 대부분 주간(晝間)에 운전하고 속도는 약 6~16km/h로 신호기를 사용하지 않고 기관사의 주의력에 의한 무신호 가시운전방식으로도 안전하게 운전할 수 있었다.(이때의 신호시스템을 1세대로 한다. 이동성을 강조한 MBTC시스템)

그러나 철도는 점차 가장 빠른 수송기관으로 성장하여 속도는 약 48km/h를 초과하게 되었고 이에 따른 열차의 안전운행 확보가 문제시되었다. 이에 대한 대책으로 영국철도회사는 수도경찰대의 경관을 신호원으로 채용하여 역과 분기개소에 배치, 선로전환기조작, 철도용지내의 법질서 유지, 선로횡단자의 단속, 선로 순시 및 진행 열차에 대하여 진행, 주의, 정지를 수신호로 표시했다. 이것을 기본으로 “철도신호의 원칙”이 수립되고 신호시스템을 구축하게 되었다. 궤도회로의 발명으로 신호시스템의 기술은 급진전 하였으며, 약 100여년 동안 궤도회로를 기반으로한 열차제어시스템이 활용되고 있다. 즉 이동성과 안전성을 추구하는 신호시스템(TBTC시스템)을 2세대로 한다. 주요 방식별 사용예는 다음과 같다.

▶ 고정폐색+Punctual Speed Control Technology

○ 지이엔효과를 이용한 방식

- 서울1,2호선, 안산선 등의 4현시 전용 ATS(Automatic Train Stop) 장치
- 한국철도공사의 3/5현시 겸용 ATS 장치

▶ 고정폐색+Continuous Speed Control Technology

○ 속도코드방식

- 서울3,4호선, 과천선, 일산선, 분당선 등의 ATC(Automatic Train Control) 장치
- 서울5,6,7,8 호선
- 부산1호선
- 광주1호선

○ Distance to go 방식

- 부산2, 3호선 / 인천1호선 / 대구2호선

최근 정부에서는 교통문제를 해결해 나가기 위하여 도로시설을 확충함은 물론 수송효율이 높은 버스, 도시철도 등 대중교통수단을 편리하게 만들어 대중교통 수송분담률을 최대한 높인다는 구상하에 도시철도 노선망 등의 확충 등 대중교통우선정책을 추진하고 있다. 이처럼 도시내 또는 도시간 이동수단으로서의 철도교통시스템이 타 교통시스템에 비하여 그 유효성이 새롭게 주목되고 있다. 그러나 도시철도의 인프라는 한정된 공간에 기존의 신호시스템으로는 운영효율을 향상 시킬 수 없어서 이미 철도선진국 등에서는 새로운 개념의 열차제어방식을 연구와 실험을 통하여 개발을 하였으며 일부 국가에서는 이 새로운 기술을 도입하여 운영하고 있는 실정이다. 즉 2세대 신호시스템의 이동성과 안전성에 운영기관의 효율성을 포함하여 개발된 CBTC시스템을 신호시스템의 3세대로 한다. 주요 방식별 사용 예는 다음과 같다.

▶ 이동폐색+Continuous Speed Control Technology

○ RF(무선랜) 방식

- 국내 : 도시철도 신호시스템 표준화연구 모델 및 분당선 시범 설치중
- 국외 : 미국LasVegas(6.4km, '04.7), 홍콩MTRC(3.5km, '05.8),

○ RF(GSM-R) 방식

- 스웨덴의 RBS, 유럽의 ETCS의 Level2 시스템

○ Inductive Loop 방식

- 캐나다밴쿠버 SKY(28.9km, '86), 영국런던 Dockland LRT(26.0km, '96)

○ 패턴벨트 방식

- 일본 도시형 자기부상열차인 HSST(High Speed Surface Transport)

2010년대 이후에는 우리나라도 유비쿼터스(Ubiquitous) 환경에서 생활하게 될 것으로 예상된다. 따라서 열차속도제어기술도 3세대 신호시스템(이동성+안전성+운용기관의 효율성)에 사용자 입장(이용의 편리성 등)을 고려한 4세대의 신호시스템이 개발 될 것으로 생각한다. 유비쿼터스 환경에서의 운영되므로 UBTC(Ubiquitous Based Train Control) System이라 명명하고자 한다. 유비쿼터스 환경이라함은 주위의 모든 사물들이(열차포함) 컴퓨팅 기능과 센서를 갖게 되고, 유무선 네트워크들이 통합됨으로써 언제 어디서나 간단하게 사용자와 사물(단말)들이 상호작용 할 수 있는 환경을 말한다. 추후 이 분야에 대한 개념 연구와 타 교통시스템과의 연계 등 많은 연구가 추진되어야 한다.

6. 결론

신호시스템을 구성하고 있는 기술들에 관하여 국내외 도시철도의 최근 사용기술 몇 가지 소개했다. 궤도회로를 기반으로하고 있는 열차제어시스템이 전반을 차지하고 있는 우리나라의 사정으로 보면, 신호기술 분야의 기술개발이 시급함을 알 수 있다. 신호통신기술 분야에서는 열차제어에 무선이 적용되는 것이 앞으로 중요하게 평가 될 것이다. 이것에 따라 지금까지 신호설비가 크게 변화할 가능성도 있다. 열차를 어떻게 안전하고 효율적으로 제어하였느냐의 관점에서 이제는 운영효율을 높이고 이용자의 관점에서 신호시스템의 기술발전이 이루어지고 있음을 알 수 있다

신호 및 통신기술 분야의 협조가 중요하다. 좀더 점진적인 기술 트렌드를 리더하기 위한 노력이 필요할 때이다.

다음에는 현재 연구수행중인 새로운 패러다임을 리더하는 통신기반열차제어시스템의 핵심기술에 관하여 논하고자 한다.

참고문헌

1. 도시철도 표준화 연구개발사업 2004년도 연구결과 보고서, 건설교통부, 2004. 12.
2. 도시철도 표준화 연구개발사업 2005년도 연구결과 보고서, 건설교통부, 2005. 12.
3. 윤용기, 김용규, 신덕호, “무선통신을 이용한 열차제어시스템”, 한국철도학회지, 제7권 제2호, pp.22-28, 2004
4. 신호보안장치의 역사적고찰, 윤권은, 한국철도기술정보지, 2003. 4
5. 강리택, 이종성, 김경식, 박계서, “차상 ATC/ATO/TWC 시스템의 열차 자동운전 구현의 현차 시험 결과고찰”, 한국철도학회 춘계학술대회, 2000
6. 김경식 강덕원, 강리택, 이종성, “ATC장치에 의한 자동운전 및 고장 추적에 관한 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회, 2002.
7. 김경식 강덕원, 이종성, 박종천, “차상신호시스템 국산화 개발 및 적용”, 한국철도학회 04 춘계학술대회논문집 , pp.349-349 , 2004.
8. <http://www.tsd.org>.
9. Matthew Gast, "802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide", O'RELLY, 2002.
10. 이종우 외 4명(2001년), “철도신호제품에 대한 신뢰성과 안전성 검증기준 제정 연구,” 한국철도기술연구원 철도청 수탁과제 최종보고서.
11. 도시철도 시스템 개론(신교통수단을 중심으로), 박병호, 김대하 편저
12. 무선을 이용한 열차제어시스템의 동향, 일본철도전기기술협회