

# 열차운행을 위한 열차제어 시스템에 대한 기술 발전 동향



| 윤 학 선 |  
한국철도시설공단  
차장



| 이 기 서 |  
광운대학교  
교수



| 박 재 영 |  
우송대학교  
교수

## 1. 서론

### 1.1 개요

1830년 철도가 처음으로 운행하기 시작할 때 기마수가 앞서서 기관사에게 깃발로 진행여부를 알려주던 것이 신호의 시초라고 할 수 있다. 이후 전신의 도입, 궤도회로의 발명 등으로 신호시스템은 전기, 전자, 전산, 통신의 최첨단 기술을 응용하여 기관사가 아닌 컴퓨터에 의해 열차를 직접 제어하는 단계에 까지 와 있다. 열차운전의 고밀도화, 기관사를 대체하는 무인운전방식의 도입 등 운영측면에서의 변화와 더불어 기존의 접촉식 열차제어방식에서 비접촉식 열차제어방식으로의 기술 발전의 추세에서 맞춰 철도신호에서 주파수가 이용된 것은 아주 오래전의 일이다. 1990년대초 까지만 해도 주로 유선을 이용한 통신방식이 전반적인 기술 추세였지만, 정보통신기술의 발달에 힘입은 신호제어기술자들의 노력으로 1990년대 중반부터 무선을 이용한 다양한 열차제어기술이 등장하기 시작하여 근래에는 경량전철, 중량전철, 고속전철 등 철도분야에서 무선을 이용한 열차제어 기술은 이제 새삼스런 현상이 아니다. 열차제어는 Fail-safe 원칙이 적용되는 특수한 설비로 그 근본 원리는 아직도 보수적이며 다소 폐쇄적인 측면을 가지고 있는 것이 사실이나, 한번 채택된 기술은 급속한 파급효과를 가지며 다양한 기술이 적용되는 특성을 가지고 있다.

본 연구에서는 열차제어에 응용되고 있는 데이터의 특성과 전송 기술에 대한 메커니즘을 소개하고 향후 열차제어시스템의 기술의 발전 방향에 대하여 제시하고자 한다.

### 1.2 전파(주파수)의 이해

물체가 일정한 왕복운동을 지속적으로 반복하여 보일 때 단위시간당 이러한 반복 운동이 일어난 회수를 주파수(진동수)라고 한다. 전파법에 “전파판 300만MHz이하 주파수의 전자파를 말한다” 라고 되어 있다.

1MHz는 100만Hz의 주파수 단위이다. 다시 말하면1초에 30억번 이하로 진동하는 전자파가 “전파” 라는 것이다.

전파는 여러 가지 파장의 전파가 있으며, 전파의 성질은 이 주파수(파장)으로 결정 된다. 전파는 높으면 높을수록 빛과 같이 직진한다. 따라서 전송할 수 있는 정보량이 많아진다. 또 직진성이 강하므로 특정방향으로 송신이 유리하게 된다. 그러나 비나 안개는 시야가 나쁘므로 빔방울이나 수증기에 흡수되기 쉽고 비오는 날에는 멀리까지 전할 수 없는 약점도 있다. 한편 주파수가 낮게 되면 직진성이 약해져서 다소간의 장애물은 초과하여 전달된다. 주파수가 낮아질수록 전송 가능한 정보량은 적어지지만 넓은 방향으로 송신하는 데에 유리하게 된다. 전파는 다양하게 구분되어 있지만 사실은 주파수를 0Hz에서 3000GHz로 구간별로 구분한 것 뿐이다. 전파의 종류는 다음 표 1과 같다.<sup>2)</sup>

전통적으로 궤도회로를 사용하는 방식에서 사용되는 전파는 사람이 들을 수 있는 음파 즉 가청주파수라고 불리는

표 1. Types of Electric Wave

구분	주파수	파장 길이	용도
X-rays	1억THz이상	0.01~100 Å	의료용, 산업용
자외선	1천THz~1억THz	397~10nm	스독용
가시광선	384THz~789THz	380~770nm	visible
적외선	3THz~100THz	1~30μm	적외선사진
서브밀리파	300GHz~3THz	0.1~1mm	전자천문학
밀리파	30~300GHz	1mm~1cm	우주관측
마이크로파	3~30GHz	1~10cm	중계기, 레이더
국초단파	300MHz~3GHz	10cm~1m	이동통신, TV, 전자레인지, 열차제어
초단파	30~300MHz	1~10m	TV(VHF), FM, 항공관제
단파	3~30MHz	10~100m	장거리통신
중파	300KHz~3MHz	100~1000m	라디오, 선박 등
장파	30~300KHz	1~10km	항공기, 선박안내용
초장파	3~30KHz	10~100km	단거리통신

20~20000Hz 대역의 주파수를 주로 사용하고 있으며 초장파이하의 저주파대역을 사용하고 있다. 통상적으로 20Hz이하의 주파수를 초저주파라고 하며 20KHz이상을 초음파라고 구분한다. 가정주파수는 사람의 청각에 의해 확인될 수 있고 전자기파의 공간방사가 적고, 물질유전체 손실, 피층효과 등도 작으며, 측정기술이 다양하게 충분히 확보되어 있고, 철(케이블)이라는 전도체에 의해 전달이 쉽다는 장점 때문에 널리 이용되고 있다.

## 2. 열차제어 데이터 전송기술의 발전

### 2.1 1세대 열차제어 기술

1830년 세계 최초로 영국의 리버풀에서 맨체스터간 철도가 개통되었다. 당시의 열차제어기법은 기마수가 열차보다 앞서가서 열차전방의 운행 가부를 알리는 제어방식이었다.

철도가 처음 등장한 초기에는 속도도 느리고, 운행 횟수도 적어 대부분 1개편성 열차로 그 선로구간을 왕복하는 정도였다. 그 후 점차 철도의 편리함이 인식되고 기술의 발전이 이루어져서 열차의 속도가 빨라지고, 운행횟수도 증가되어 대량수송 교통수단으로 발전하게 된다.

이후 철도는 터널 또는 단선구간에서 도중 정차하여 열차가 충돌하는 사고가 빈번히 발생하게 된다. 이에 따른 안전을 확보하기 위하여 선행열차와 후속열차 사이에 일정한 시간간격을 두고 열차를 출발시키는 시간간격법(Time Interval Block System)이 등장한다.

1842년 일일 열차 운행횟수의 증가에 따라 계속되는 충돌 및 추돌 사고의 방지를 위하여 공간간격법(Space Interval Block System)이 등장하는데 이는 열차를 일정한 간격을 두고 운행하는 방식이다. 공간간격법에는 선로에서 일정구간에 한 개의 열차만 운행하게 하는 폐색(Block)의 개념이 등장하는데 폐색방식에는 크게 나누어 고정폐색방식, 가상(논리)폐색방식, 이동폐색방식으로 나누어질 수 있다.<sup>3)</sup>

### 2.2 2세대 열차제어 데이터 전송기술

#### 2.2.1 궤도회로장치

열차제어 데이터 전송기술은 1872년 윌리엄 로빈슨에 의해 궤도회로장치가 개발되면서 획기적으로 발전하는 계기가 되었다. 이후 1910년대 전세계적으로 널리 보급되면서 운행중인 열차의 위치를 검지하여 열차의 간격을 제어하는 기본적인 핵심적인 장치로 오늘날까지 널리 이용되고 있다.

그림 1은 일반적인 궤도회로를 나타내고 있다.

궤도회로장치의 발명은 철도의 대량수송교통수단으로서의 발전과 유효성을 입증시키면서 그 중요성과 의존도가 높아졌으며, 전 세계적으로 이용율이 매우 높은 실정이다. 궤도회로장치의 이용율은 우리나라의 경우에도 마찬가지

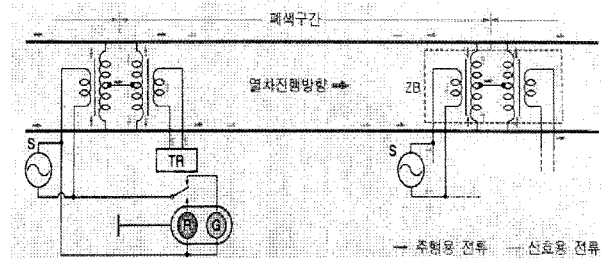


그림 1. Principle of Track Circuit(Double rail)

표 2. Applications of Track Circuit

사용개소	종류	비고
직류전철구간	AF, PF궤도회로 임펄스 궤도회로	도시철도 등
교류전철구간	임펄스 궤도회로 직류바이어스 궤도회로 분주, 배주, AF궤도회로	국철간선, 전철 KTX
비전철구간	직류 바이어스, 직류, AF 궤도회로	국철 지선 일부

가지여서 현재 운행중인 국철구간, 도시철도구간에서 100% 사용중인데 KTX를 비롯해 주요 국철간선, 도시철도, 광역철도 등 전 구간에서 궤도회로를 사용하고 있다. 궤도회로장치는 열차를 감지하고 제어정보를 전달하는 기능이 외에 레일의 절단 감지, 전기철도에서 귀선회로로 이용되는 등 그 용도가 매우 다양하며 전자통신 기술의 발전에 따라 데이터 전송도 기존의 소용량의 아날로그 데이터 전송에서 대용량의 디지털 데이터 전송에 까지 기술 개발이 되어 있다. 이와 같은 많은 장점에도 불구하고 궤도회로는 몇 가지 단점이 있는데 물리적으로 고정된 구간에서 사용되는 관계로 현대 철도에서 요구되는 고밀도 고효율의 운전시각을 요구하는 경량철도 등에 적용의 한계가 들어나고 있으며, 고가의 유지보수 비용, 개량 및 개조의 어려움, 단락감도에 의한 불안전 요소 등이 있다.

궤도회로는 사용하는 열차의 종류, 전기방식, 운전방식

표 3. Types of Track Circuit

노선별	종류	주파수	회로구분
KTX(고속)	AF궤도회로	2040~3120Hz	공심유도차
국철(일반)	AF궤도회로	1699Hz~2445Hz	임피던스본드
국철(전철)	임펄스궤도회로	3Hz(임펄스)	임피던스본드
서울1,2,3	AF궤도회로	1590~5190Hz	미니본드
서울2	AF궤도회로	9500~16500Hz	S본드
서울5~8	AF궤도회로	2100~3900Hz	미니본드
서울9	AF궤도회로	9500~20700Hz	S본드
공항철도	AF궤도회로	9500~20700Hz	S본드
인천1	AF궤도회로	9500~16500Hz	S본드
대구1	AF궤도회로	2970~4950Hz	미니본드
대구2	AF궤도회로	9500~20700Hz	S본드
대전1	AF궤도회로	9500~16500Hz	S본드
광주1	AF궤도회로	3450,2850Hz,5250Hz	S본드
부산2	AF궤도회로	6000~5400Hz	S본드
부산3	AF궤도회로	3450,2850Hz,5250Hz	S본드

(시각)에 따라 다르며 적절한 궤도회로를 채택하여 사용하게 된다. 사용개소에 따른 궤도회로의 구분은 다음 표 2와 같다.

우리나라 철도는 크게 고속철도, 일반철도, 광역(도시)철도, 경량철도로 나눌 수 있는데 경량철도를 제외한 모든 운행중인 철도가 궤도회로를 사용하고 있다. 노선별로 사용하는 궤도회로의 종류와 주파수 특성은 다음 표 3과 같다.

### 2.2.2 열차자동정지장치(A.T.S)

열차자동정지장치는 기관사를 보조하여 지상신호기 및 궤도회로와 연동하여 열차 운행에 따른 조건을 지상자로 불리는 장치에 전달하여 제어조건에 따른 주파수 제어조

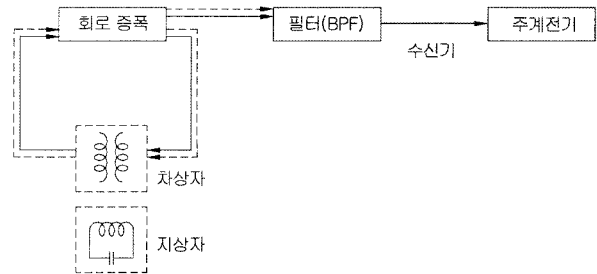


그림 2. Concept of ATS Operation

표 4. Type of Resonance frequency(4aspects)

신호현시		R0	R1	Y	YG	G
전기동차	공진주파수 (kHz)	130	122	106	98	98
	속도제어 (km/h)	0	15	45	최대속도	

표 5. Type of Resonance frequency(5aspects)

신호현시		R0	YY	Y	YG	G
디젤 기관차	공진주파수 (kHz)	130	122	114	106	98
	속도제어 (km/h)	0	25	65	105	최대속도
전기동차	공진주파수 (kHz)	130	114	106	98	98
	속도제어 (km/h)	0	25	45	최대속도	

건으로 기관사에게 열차를 정지하도록 명령을 전달하는 장치이다.

열차자동정지장치는 차상장치와 지상장치로 구성되는데 지상장치는 계전기를 이용하여 신호기 현시조건에 따라 공진회로의 주파수를 발생시켜 열차에 부착된 차상자와 응동하여 공진회로를 구성하여 해당 주파수에 따른 제한속도를 확인하고 열차를 자동적으로 정지시키는 장치이다. 사용방식에 따라 점제어식과 속도조사식이 있는데 공진주파수에 따른 신호현시조건과 속도제어 조건은 점제어식의 경우 제어계전기의 접점을 개방한 상태에서 125KHz~131KHz이며, 속도조사식 다음 표 4, 5와 같다.<sup>3)</sup>

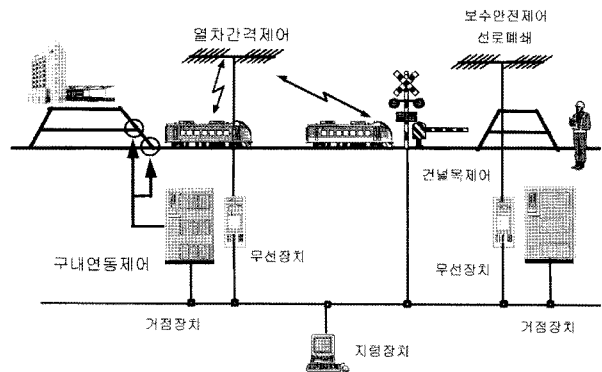


그림 3. Concept of Communication Based Train Control

### 2.3 3세대 열차제어 기술

1990년대 중반이후 무선통신기술의 급속한 발전은 다양한 분야에서 여러 가지 형태로 응용되기 시작한다. 열차제어시스템에서도 기존의 궤도회로 및 케이블을 이용하는 유선통신 데이터 전송의 단점과 한계를 인식하고 고속, 대용량의 데이터 전송을 위하여 무선을 이용한 열차제어시스템의 개발이 시작된다.

지상의 거점에 위치하는 컴퓨터가 각 열차로부터 위치와 속도를 주기적으로 수집하고, 선형열차와 속도 제한 지점까지의 거리를 열차로 전송하고, 차상의 제어장치가 열차 성능에 맞는 최적의 속도제어를 하는 것으로 지상과 차상간의 데이터 전송에 무선을 사용하는 무선통신기반열차제어시스템의 도입이다.

#### 2.3.1 통신기반 열차제어정보형식의 설계

통신기반열차제어시스템의 제어정보형식의 설계에 있어서 가장 중요한 것은 차상 무선통신장치(SA)와 지상무선통신장치(AP)와의 데이터 전송방식이다.

일반적인 통신기반 열차제어에서 전송되는 메시지는 열차번호, 정차위치, 차량편성번호, 운전모드, 열차길이, ATO 자체상태, ATP설비 상태, 차량 상태, 도착역 코드, 다음역 코드, ATO location ID, 현재 ATP 모드, 출입문 정보, ATO 제한속도, Skip Stop, 출입문 정보, 에러 등 다양한 정보를 전송한다.<sup>7)</sup>

2세대까지의 열차제어기술이 이동성과 안전성의 보장

표 6. Comparison of Train Control System

구분	안정성	속도	시각	과적성	건설비용 보수비용	발전성 확장성	비고
지상신호	△	△	△	△	△	△	기준
차내신호	○	○	○	○	×	△	
무선제어	◎	◎	◎	◎	◎	◎	

에 중점을 두었다면 3세대 열차제어기술은 이동성, 안전성에 가용성과 유지보수성 보장 기술을 구현한 것이라고 볼 수 있다. 무선통신기반 열차제어시스템을 개발하거나 성공한 각국의 사례를 살펴보면 도심형, 중고속, 고속열차에 따라 그 시스템 구현방식이나 특성이 매우 상이함을 알 수 있다. 표 6은 열차제어시스템별로 비교한 자료이다.<sup>4)</sup>

#### 2.3.2 통신기반열차제어 주파수대역폭 및 주파수

통신기반열차제어에서 전송용량 결정은 철도에서 전용 주파수로서 사용하고자 하는 소요주파수대역폭결정에 가장 중요한 역할을 담당하기 때문에 매우 중요한 파라미터이다. 그러나 전송용량에 대한 설계는 사용되는 데이터의 용도, 특성 및 종류에 따라 크게 차이가 나타날 수 있기 때문에 각국에서 현재 사용하고 있는 CBTC관련 시스템의 전송용량을 중심으로 계산을 수행 하였다.

아직 우리나라에서는 CBTC 시스템에 대한 구체적인 통신시스템이 설계되지 않는 상황으로 가장 보편적으로 많이 사용되고 있는 ETCS시스템의 전송률(3,874bps)을 기초로 통신시스템을 설계하는 것이 바람직하다는 결론을 내리고 이 시스템을 기준으로 전송률을 계산하기로 하였다.

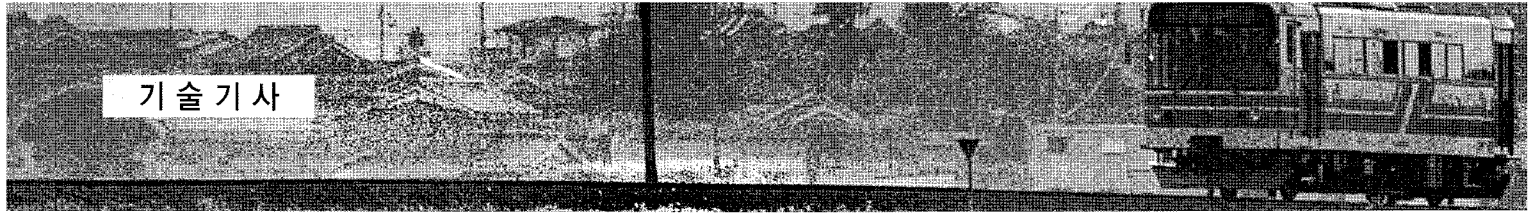


표 7. Basic factor Distribution Frequency of CBTC

항목	대도시선로	전국선로
1개 열차당 소요 bit수	5Kbps	5Kbps
기지국송수신전송속도	50Kbps	50Kbps
지지구 서비스영역	~ 2km	2~수km
1개선로구간 반복사용주파수	4개 주파수 (상·하향 8개)	4개 주파수 (상·하향 8개)
철도회사별 선로구간(노선) 수	7개 구간 선로	4개 구간 선로

따라서 이 기준에 향후 추가되는 데이터의 양을 고려하여, 무선용 CBTC시스템 도입에서 사용되는 전송용량을 1개 열차편성당 5Kbps로 가정하였다.

통신방식에 따라 차이는 있으나, 일반적으로 1bit의 데이터 전송을 위하여 1Hz의 대역폭이 필요하다고 가정할 때, 1개의 채널에 대한 전송속도 50Kbps는 50KHz의 대역폭(주파수간격)이 필요하다고 가정하였다. 이와 같은 가정으로부터 다음과 같이 계산되는 소요주파수대역폭은 약 4.4MHz이다.<sup>1)</sup>

- 1개 선로구간의 4개 쌍 주파수(상·하향, 8파) × 대도시 7구간 × 주파수간격(50KHz) = 2.8MHz
- 1개 선로구간의 4개 쌍 주파수(상·하향, 8파) × 전국선로 4구간 × 주파수간격(50KHz) = 1.6MHz
- 소요주파수대역폭 : 대도시선로(2.8MHz) + 전국선로(1.6MHz) = 4.4 MHz

#### 2.4 4세대 열차제어 기술

21세기에 들어서면서 세계 각국에서 통신기술을 기반으로 한 열차제어시스템의 단일화를 기향하는 차세대 기술의 연구가 시작되었다.

이른 바 유비쿼터스 사회를 지향하는 유비쿼터스기반 열차제어시스템의 구현이 그것이다.

기존의 철도가 가지고 있는 다양한 장점들인 이동성, 안전성, 가용성, 보수성에 이용자 편리성을 중점으로 하는 차세대 열차제어기술인 것이다. 현재 선진국을 중심으로 2010년까지 관련 기술을 개발하여, 2020년대에 상용화가 시작될 것으로 예상된다.

##### 2.4.1 4세대 열차제어 전송기술의 특성

4세대 열차제어 데이터 전송기술의 특성은 고객의 needs와경제적인 필요성에 의해서 요망되고 있으며, 음성통신, CCTV, 열차 제어용 데이터를 비롯한 여러 데이터서비스를 하나의 무선시스템에 통합하는 것을 의미한다.

통신기반 열차제어 정보는 다른 정보들보다 열차운행에 있어 훨씬 더 중요한 정보를 가지고 있기 때문에, 우선순위나 실시간 보장 등의 서비스질 (quality of service, QoS)을 제어하는 메커니즘을 필요로 한다.<sup>8)</sup>

- 무선시스템은 최대 500km/h까지 신뢰성 있는 무선통신이 가능해야 한다.
- 고속주행에 의해 신뢰도가 절감되거나, 데이터 전송속도가 감소되지 말아야 한다.
- IP는 전세계적으로 가장 널리 사용되는 데이터 프로토콜이고 용이한 설치, 케이블링 재활용 및 비용 절감, 표준 통신망 설비의 사용, 개방된 특성으로 보안, 안전에 신중해야 한다.
- 주파수는 면허대역 사용으로 간섭을 근본적으로 해소시켜야 한다. GSM-R이 면허대역을 사용하나, 낮은 데이터 스루풋으로 4세대에 적합하지 않다. 이를 위하여 열차제어 전용의 충분한 대역의 확보가 가능한 주파수의 할당이 필요하다.<sup>9)</sup>

##### 2.4.2 열차제어 전송주파수 및 대역설계

전송용량 결정은 철도에서 전용주파수로서 사용하고자 하는 소요주파수대역폭결정에 가장 중요한 역할을 담당하기 때문에 매우 중요한 파라미터이다. 우선 유럽의 ERTMS/ETCS의 경우에는 차상에서 지상으로 데이터를 전송할 때 데이터 전송량이 많은 고장데이터모드를 적용하면, 1회 데이터전송에 약 1,937bit의 데이터양이 요구된다. 미국의 Alcatel에서 사용하는 IEEE802.11 FHSS방식에서는 철도 1개편성에서 요구되는 최대 전송률은 Max. 20Kbps로 설계되어 있으나, 실제적으로 ATP와 ATO사이에서 전송하는 전송률은 2.4Kbps를 사용하고 있다. 또한 현재 우리나라에서 설계되어 운용되고 있는 분당선의 경우에는 1개 열차편성당 56byte(448bps)정도의 용량이 필요하다. 이 기준에 향후 추가되는 데이터의 양을 고려하여, 무선용 CBTC시스템도입에서 사용되는 전송용량을 1개 열

차편성당 5Kbps로 가정하였다.

기지국 당 열차편성수는 IEEE 1474.1-2004 규격에서 10~40개의 편성으로 규정하고 있다. 우리나라의 상황을 고려할 때 한 개의 기지국(1개의 철도회사별 또는 선로구간별)이 제어할 수 있는 철도의 편성 수는 10개정도로 가정하였으며 상향·하향회선을 별도의 주파수로 설계한다. 기지국에서는 상향과 하향에 각각 서로 다른 주파수를 사용하며, 1개 열차편성당 5Kbps의 전송속도를 가정하였으므로 각각 10개의 상·하향회선을 고려할 때 1개의 채널당 50Kbps의 전송속도를 갖는다.

기지국의 서비스영역은 대도시구간과 전국철도구간으로 나누어서 분류하여 1개의 기지국이 제어할 수 있는 대도시구간과 전국철도구간의 열차 편성상황을 고려할 때 주파수 효율을 향상시킨다는 관점에서 2Km의 기지국 서비스영역에 대한 10개의 차량 편성은 적절하다고 생각된다.<sup>(1,6,9,10)</sup>

#### 4. 결론

지금까지 열차제어기술에 응용되는 데이터 전송기술의 발전에 대하여 기술하였다. 철도 초기의 사람에 의한 HBTC(Human Based Train Control)기술에서 1872년 궤도회로의 발명 이후 현재까지 널리 사용되고 있는 TBTC(Track-circuit Based Train Control)기술, 2003년 이후 미국, 프랑스, 캐나다 등에서 널리 상용화되고 있는 CBTC(Communication Based Train Control) 21세기 들어 연구개발이 시작되어 2005년 이후 국가의 교통정책이 오랜 기간동안 도로교통 위주에서 철도와 대중교통으로의 전환을 선언하고 교통의 환경성, 투자의 형평성, 안전성을 높이기 위한 교통체계를 수립하기로 하여 새로운 교통체계를 완성할 신기술에 대한 연구가 필요하게 되었다.

미국의 경우 21세기 교통정책 방향 선언인 "21세기교통

형평법 선언"을 통하여 향후 교통정책의 중심을 효율성에서 형평성으로 전환을 선언하였다.

형평성의 주요 내용은 신규 시설의 건설보다는 기존 시설의 관리를 효율화하고 교통으로 야기된 환경문제를 개선하는 데 있으며, 열차제어시스템의 경우 기존의 궤도회로기반 열차제어시스템에서 무선통신기반 열차제어시스템으로 전환중이며, 유비쿼터스 사회환경에 부응하는 또 한번의 열차제어시스템 기술의 업그레이드가 추진되고 있다.

국내에서는 궤도회로기반의 2세대 열차제어기술에서 통신을 기반으로 하는 3세대 열차제어시스템으로 경량전철을 중심으로 기술이 도입되기 시작하여 몇몇 노선은 개통을 앞두고 있으며 한국철도기술연구원, 한국철도시설공단, 한국철도공사를 중심으로 중장기 계획으로 주요 간선에 대하여 통신기반열차제어로 개량할 계획을 수립하고 있다. S

#### ◆ 참고 문헌

1. 손덕환 외(2008), "철도 전용주파수 분배방안 연구반 최종보고서" 한국철도기술연구원
2. 대한민국 주파수 분배표(2008), 한국전파진흥협회
3. "철도신호시설지침(2008)", 국토해양부 간선철도과
4. 도시철도 신호시스템 표준화 연구보고서(2006.12), 한국철도기술연구원
5. 박진태(2003), "차세대 무선네트워크 기술 동향", 전자부품연구원
6. 진성근 외(2007), "IEEE802.11 무선랜을 위한 무선 네트워크 관리 기술", 한국전자통신연구원
7. 도시형자기부상열차실용화사업 시범노선 건설 기본 및 실시설계 보고서(2008), 한국철도시설공단
8. Jong-Ki Kim(2006), "A Construction Method for CBTC Communication Networks", pp.1-7.
9. Jong-Ki Kim(2006), "An Optimized Construction of Telecommunication Network for Train Control", pp.420-422.
10. S.H Ryu, "A study on the applicable scheme of Communication Based Train Control system in subway", EMECS.