

## 열차제어시스템의 무인 자동화 기술 현황

김용규(한국철도기술연구원)

### 1. 서론

2007년 6월 10일 프랑스 TGV(Train a Grande Vitesse) 고속열차의 열차 운행 최고 속도 574.8km/h와 함께 속도 향상, 안전성, 및 열차 운행의 자동화에 대한 연구는 또다시 새로운 전기를 맞이하게 되었으며, 21세기는 철도 르네상스 시대라는 구호 아래 많은 국가들이 접근성이 용이한 철도 교통의 개발에 더욱 많은 노력을 기울이고 있다<sup>1)</sup>. 우리나라의 경우에도 2004년 4월 2일 경부고속선의 개통을 시작으로 그동안 철도 강대국으로 불리던 프랑스, 독일, 일본과 국제 시장 경제에 참여하기 위해 한국형 고속철도, 틸팅 열차, 자기부상 열차, 경량 전철, 등 많은 연구 개발의 결과를 탄생시켰다.

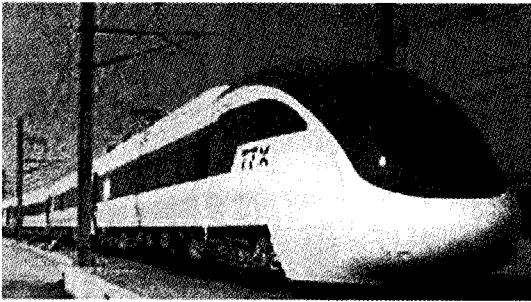
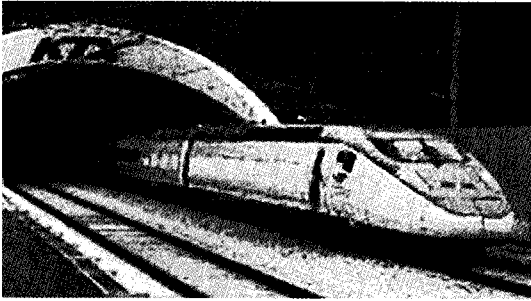
본 논고에서는 철도시스템의 무인, 자동화와 밀접한 관계를 갖는 열차제어시스템에 대해 분석함으로써 미래의 기술 동향 및 연구 방향에 대해 집중적으로 검토하였다. 이에 따라, 제 I 장은 열차제어시스템의 탄생과 정의에 대해, 제 II 장은 열차제어시스템의 특성을 고속선, 기존선, 도시철도로 분류하여 검토하였다. 제 III 장에서는 열차제어시스템의 기술 현황 및 개발 방향에 대

해, 마지막으로 제 IV 장에서는 무선을 사용한 열차제어시스템의 차세대 기술 개발 동향에 대해 간략하게 설명하였다.

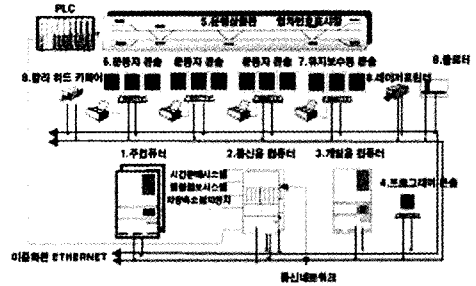
### 1. 열차제어시스템의 정의

초기의 철도시스템은 차량과 선로를 기본으로 발전이 시작되었고, 이는 사용 에너지에 따라 증기 기관차, 디젤 기관차, 전기 기관차의 순으로 에너지원의 변화가 진행되었다. 열차 운행 측면에 있어서 속도 및 운행 열차의 수가 적었던 초기에는 신호용 깃발을 사용하였지만, 열차 운행 속도 및 운행 열차 수가 점점 증가함에 따라 도로 교통과 유사한 신호등에 의한 열차 운행 제어(지상신호 방식), 안전성과 열차 속도를 자동제어하기 위한 차량에서의 열차 속도 제어(차상신호 방식), 무선에 의한 자동 열차 제어 및 무인 운전 시스템의 실현, 그리고 인공위성을 활용한 무선 통신 열차제어 시스템 순으로 연구 개발이 점점 확장되는 추세이다<sup>2)</sup>.

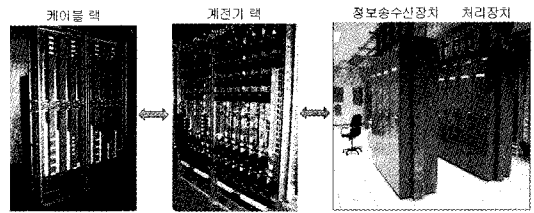
열차의 운행에 연관된 모든 제어 및 명령은 열차제어시스템(TCS : Train Control System)으로 정의되며, 이는 열차의 진행 방향, 이동 속도, 선



〈그림 1〉 국내 개발 고속 및 틸팅 열차



〈그림 2〉 열차집중제어 시스템



〈그림 3〉 자동열차제어 시스템

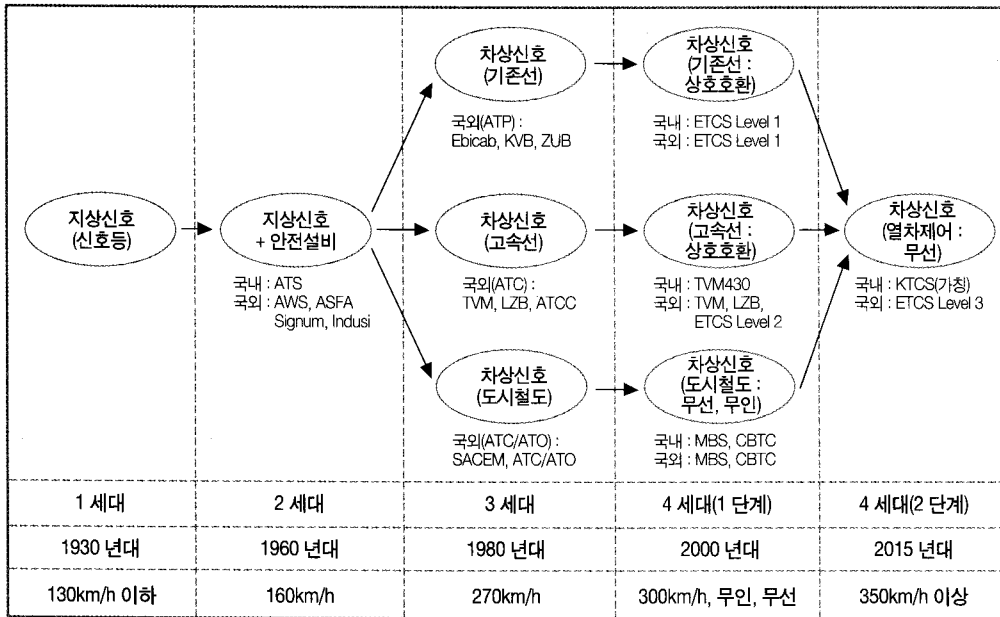
행 열차와 후행 열차간 거리, 주변 환경 및 선로의 안전성 등을 판단한 후, 기관사(무인 운전시에는 열차의 운전실에 장착된 차량 컴퓨터)에게 관련 정보를 전달한다. 이러한 목적을 위해 열차 제어시스템은 센서에 의한 선로 및 주변 환경 인지, 필요시 시각 및 청각용 경보 및 차량 안전 조치를 자동으로 실행한다<sup>4)</sup>. 열차제어시스템은 열차의 이동 감시 및 열차 운영을 취급하는 열차집중제어(CTC : Centralized Train Control), 열차의 진로를 결정하는 연동장치(IXL : Interlocking), 그리고 열차의 운행 속도를 명령, 제어하는 열차제어로 구성되며, 이들은 각각의 필요성과 안전성에 입각한 통신망으로 결합된다<sup>4)</sup>. 열차집중제어와 연동장치는 기존선, 고속선, 도시철도가 대부분 유사한 형태로 주어지는 반면, 열차제어는 사용 환경에 따라, 자동열차정지(ATS : Automatic Train Stop), 자동열차보호(ATP : Automatic Train Protection), 자동열차제어(ATC : Automatic Train

Control), 자동열차운영(ATO : Automatic Train Operation), 자동열차감시(ATS : Automatic Train Supervision) 등으로 분류되며, 각각의 노선 특성에 부합하는 시스템을 선별하여 사용한다<sup>3-5)</sup>.

## 2. 열차제어시스템의 특성

일반적으로 열차제어시스템은 그림 4와 같이 주요 변환점을 기준으로 각각의 세대별로 분류된다. 제1세대는 1930년대까지의 열차제어시스템으로 주로 궤도에 설치된 신호등에 의해 기관사가 열차의 진행 및 정지를 실행함으로써 지상 신호 방식이라 한다.

제1세대의 특징은 열차 속도가 130km/h 이하이며, 전기적인 소자에 의해 열차제어시스템의 동작이 실현된다. 그러나 열차 운행 속도와 운행 열차 수 증가에 의해 이러한 열차제어시스템은 기관사가 신호등을 무시하고 열차



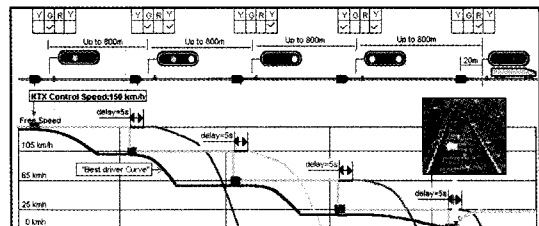
〈그림 4〉 열차제어시스템 변천 과정

를 운행함으로써 유발되는 충돌 및 추돌 사고에 유연히 대처할 수 없음을 따라 이를 보완하기 위한 안전 설비의 추가가 요구됨으로서 제2세대 열차제어시스템으로 천이 된다<sup>4)</sup>.

제2세대 열차제어시스템은 대부분 대형 참사로 연결되는 철도 사고에 따른 인명 및 재산 피해를 방지하기 위해 제1세대를 보완하는 형태로 신호 설비의 개발이 유도되었다. 이는 차량 충돌 또는 추돌로 인해 발생하는 기관사의 오류로 인한 열차 사고를 최소화하기 위해 기관사는 신호등 색상에 따라 주어지는 열차 운행 최고 속도를 초과하는 경우, 선로에 설치된 지상장치(Beacon 또는 Balise)에 의해 경보 신호가 기관사에게 전달되며, 만약 기관사가 일정 시간 이상 이러한 경고를 무시할 경우, 열차는 자동으로 정지하게 된다. 국내의 경우 1960년대의 경부선 대형 열차 참사 이후, 일본에서 도입된 자동열차정지(ATS) 장치

치가 이러한 목적을 위해 사용 중에 있으며, 국외에서는 AWS(Automatic Warning System), Indusi, Signum, ASFA, 등과 같은 이름으로 사용되고 있다<sup>4)</sup>.

1980년대에는 전자 기술의 발달로 인해 타 산업 분야뿐만 아니라, 철도 분야에 있어서도 기존의 전기 소자를 전자 소자로 대체한 새로운 설비가 사용되었다. 또한 열차의 최고 상업 운행 속도가 270km/h까지 증가함에 따라 고속 열차 전용



〈그림 5〉 ATS에 의한 열차 정지 Sequence

선로가 등장하였고 기존 열차의 운행 속도도 기관사의 신호등 현시 한계치로 주어지는 160km/h 이상으로 증속됨으로서 더 이상 신호등에 의한 열차 제어가 불가능하게 되었다<sup>6)</sup>.

특히 열차의 운행 간격을 의미하는 운전 시격은 도시철도의 경우 180초까지 접근함으로써 기존의 신호 시스템에 의존하는 것은 안전 측면에서 허용되지 않았다. 그 결과, 제3세대는 열차의 정지는 물론 속도 제어까지 기관사의 의지에 관계없이 강제로 실행함과 동시에 기관사는 기관실에 설치된 MMI(Man Machine Interface)에 의해 단지 열차 운행을 지원하는 역할을 하며, 고속선, 기존선, 도시철도의 3개축으로 분류되어 기술 개발이 진행되었다<sup>4)</sup>.

#### (가) 고속선의 경우

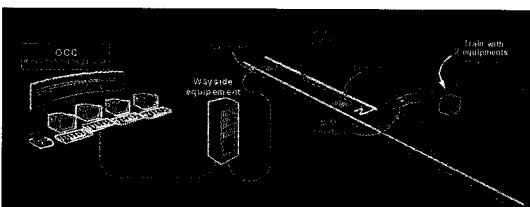
1987년 프랑스의 최초 고속선인 TGV 동남선에서 열차의 상업 운행 고속화가 시작되었다. 고속선은 동일한 유형의 특성을 갖는 열차가 일정한 시간 간격으로 장거리 노선을 고속으로 운행함으로써 속도에 따른 안전성이 가장 큰 열차제어시스템의 과제로 주어졌다. 그 결과, 고속선에서는 열차를 자동으로 제어한다는 의미의 자동열차제어(ATC) 장치와 이를 보완할 수 있는 많은 안전 장치가 도입되었다. 자동열차제어장치는 선로에 설치된 궤도회로라 명명된 전기회로 또는 루프 케이블을 통해 선로변 환경에 부합하

는 열차 운행 속도를 차량으로 공급한다. 궤도회로에 의해 정보를 제공하는 열차제어시스템은 프랑스 TGV에서 사용하는 TVM이 대표적인 제품으로 경부고속선에서 사용하는 TVM430은 이러한 TVM 계열이며, 루프 케이블을 사용하는 대표적인 시스템은 독일 ICE에서 사용하는 LZB 시스템으로 명명된다<sup>2), 6)</sup>.

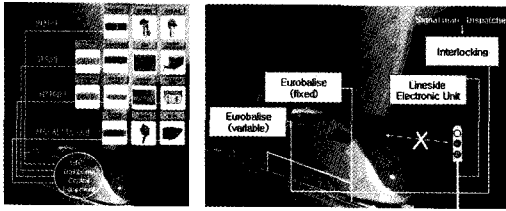
이러한 자동열차제어장치의 차량 장착 컴퓨터는 지상에서 공급된 정보, 열차의 현재 상태, 그리고 궤도 및 선로변에 설치된 센서 및 검지 장치로 구성된 안전장치에서 차량으로 제공된 선로변 환경 및 기후 조건을 기본으로 실제로 열차가 운행하는데 적합한 속도를 생성한다. 이때 기관사는 MMI에 현시된 속도와 시정각 경보에 따라 열차 운행시 필요한 안전 조치를 실행하며, 이러한 일련의 동작이 불확실한 경우, 열차는 안전측으로 자동속도제어 또는 비상 제동을 실행한다<sup>3)</sup>.

#### (나) 기존선의 경우

200km/h 이하로 운행되는 기존선의 경우에는 비록 열차 속도가 고속선에 비해 현저히 낮지만, 지상의 신호등은 속도에 따라 기관사의 시인성을 저하함과 동시에 화물열차와 같은 저속 열차가 제한된 선로에서 복합 운행됨으로서 각각의 열차 속도가 상이하게 주어진다. 이러한 특성은 고속선 자동열차제어장치의 기존선 적용이 경제적, 효율성의 측면에서 부적합한 것으로 확인됨에 따라, 새로운 열차제어시스템의 구성을 검토하였다. 그 결과, 궤도회로에 의한 연속적인 정보 전송 기능을 Balise 또는 Beacon으로 명명되는 지상자를 사용하여 불연속적으로 정보를 지상에서 차량으로 전송하는 새로운 열차제어시스템을 형성하였다<sup>3), 7)</sup>.



〈그림 4〉 경부고속선 자동열차제어장치



〈그림 5〉 틸팅 차량의 ATP 기본 구성

이러한 시스템은 다양한 유형의 열차간의 충돌 및 추돌을 방지하기 위한 방호 개념을 중심으로 개발됨에 따라 자동열차보호(ATP)로 명명되었으며, 독일의 ZUB, 스웨덴의 Ebicab, 프랑스의 KVB 등이 이러한 유형의 대표적인 예로 주어진다.

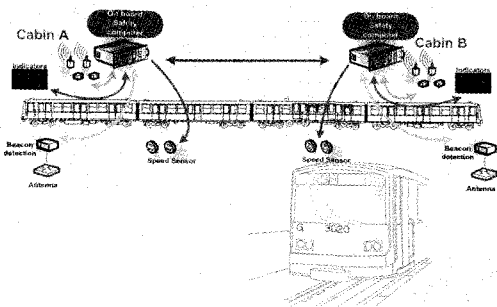
(다) 도시철도의 경우

1975년 서울지하철 개통과 함께 초기의 열차 제어시스템은 제2세대의 자동열차정지(ATS) 시스템이 사용되었다. 도시철도는 동일한 유형의 속도 및 성능을 갖는 100km/h 이하의 저속 열차가 운행되는 전용 노선의 개념이 고속철도와 유사하지만, 많은 역이 짧은 간격으로 설치됨으로서 자동열차운영(ATO) 및 자동열차감시(ATS)의 기능이 추가적으로 요구되었다<sup>5)</sup>. 여기서, 자동열차운영은 미리 설정된 프로그램에 따라 열차 감속 및 정지 관련 열차 제어 기능을 실행하며, 이는 기존에 승무원이 수동으로 실행한

역간 운전, 열차 정지, 출입문 제어, 열차 출발, 안내 방송 등에 컴퓨터를 도용함으로써 열차 운전 상태를 열차 운행 제어 컴퓨터로 감시하는 기능을 실행한다. 그리고 자동열차감시는 열차 상태 감시 및 열차 운영 패턴을 유지하기 위해 열차 운영 명령에 대한 적절한 통제를 실시한다. 열차의 도착과 출발은 이러한 시스템에 의해 각각의 역에서 통제되며, 현장에서의 자동장치에 의한 조정과 열차운행제어컴퓨터 프로그램에 의한 자동 조정으로 구분된다. 이러한 특성을 갖는 열차제어시스템은 일반적으로 ATC/ATO, ATP/ATO라는 명칭으로 타 열차제어시스템과 구별된다<sup>5)</sup>.

3. 열차제어시스템 기술 개발

제4세대로 분류되는 미래 철도는 최근에 개발되어 운영 또는 시험 중이거나 가까운 장래에 개발 완료 예정인 1단계와 장기적인 목표로 추진중인 2단계로 분류된다. 제4세대의 특징은 열차 운행 속도 300km/h 이상과 무선 및 정보 기술을 최대한 활용한 무인, 자동 운전의 개념에 따라 궤도에 설치하는 장비를 최소화함으로써 안전 및 운영, 유지보수 비용 절감을 고려하였다<sup>6)</sup>. 특히 각 국가간의 신호시스템을 상호 호환하여 열차가 운행할 수 있도록 한 상호호환성은 물론 독점적인 시장 구조에 의한 가격 상승을 최소화하기 위한 통합된 열차제어시스템의 개발을 우선적으로 요구하였다. 이러한 요구에 따라 궤도 설치 장비의 최소화, 속도에 무관한 모든 노선의 열차에 적용 가능한 열차제어시스템, 열차제어시스템 상호호환성을 위한 설비의 소형화 및 모듈화, 선로 용량 및 운전시각의 최소화, 무선 시스템의 확대가 주요 연구 개발 목표로 설정되었다.

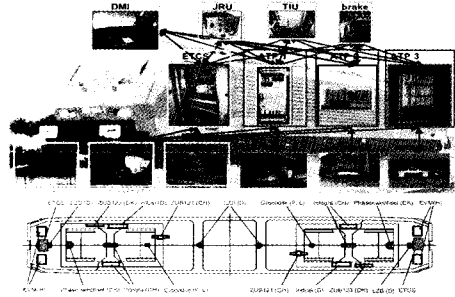


〈그림 6〉 도시철도 열차제어시스템 구성

### (가) 기존선과 고속선의 경우

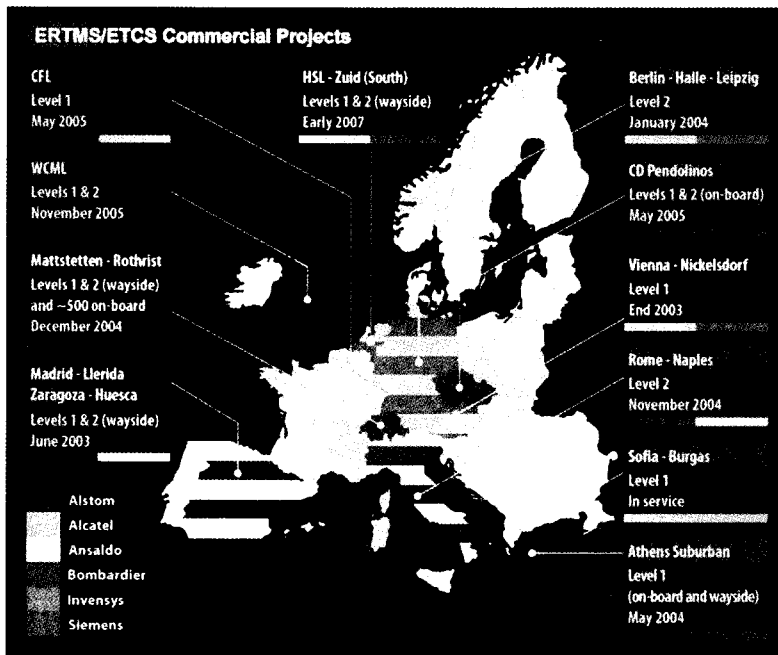
기존선과 고속선의 경우, 각각의 국가간 열차 제어시스템이 상이하게 주어짐으로서 국경을 통과시, 환승의 개념이 도입되었지만, 1990년대에는 각각의 국가에서 사용하는 모든 열차제어 시스템을 차량에 장착함으로써 환승의 필요없이 국경을 통과할 수 있도록 운영 방법이 변경되었다.

이러한 운영 방법은 차량에 장착해야 할 다수의 열차제어시스템으로 인해 차량 공간의 부족, 그리고 각각의 신호체계에 따른 간섭 현상으로 인해 안전성의 문제점 등이 유발되었으며, 특히 기관사는 각각의 국가 통과에 따른 열차제어시스템 체계 및 각국의 상이한 사용 언어의 숙지가 가장 큰 문제점으로 부각되었다기. 따라서 관련 문제점에 대한 연구는 1985년부터 프랑스와 독일을 중심으로 초기 연구가 진행되었다. 초기 연

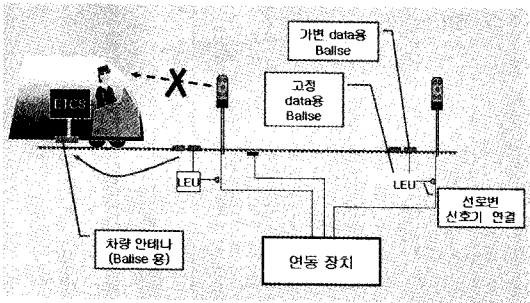


〈그림 7〉 다중 열차제어시스템 장착 예

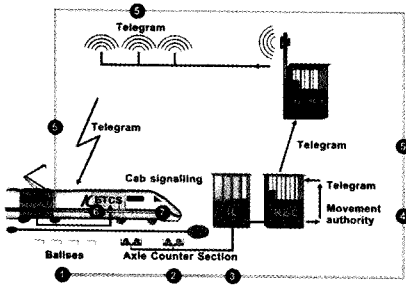
구의 결과는 열차제어시스템 관련 시장 개방에 따른 특정 회사의 독점 방지, 철도용품 제조업체의 경쟁력 강화 및 비용 절감, 열차제어시스템 표준화, 유럽 표준에 의한 유럽 철도망 통합, 국제화한 열차 운행 규정, 높은 수준의 안전성 실현이라는 명제 하에 1998년 유럽열차제어시스템(ETCS : European Train Control System)을 위한 철도



〈그림 8〉 ETCS 상업 운영 노선



〈그림 9〉 ETCS Level 1의 원리



〈그림 10〉 Level 2의 원리

관련 유럽 규정을 개정하였다. 그 결과, 새로운 철도망 건설 또는 기존 철도망 개량시에는 반드시 ETCS를 설치할 것을 법령화하였으며, 유럽 연합(EU : European Union)과 국제철도연맹(UIC : Union International des Chemins de fer)의 후원 아래 유럽 27개 국가가 ETCS의 개발 및 관련 상업 운행 노선 개발에 참여하였다.

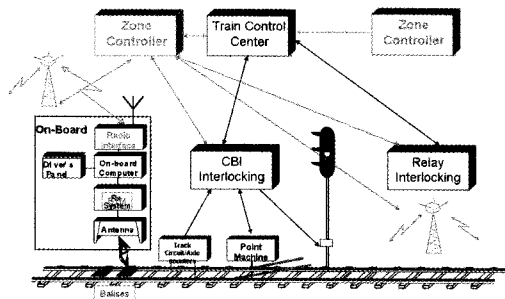
ETCS는 적용된 기술 추세에 따라 3개의 Level로 분류된다. Level 1은 기존의 자동열차보호(ATP)에 대한 표준형으로 주로 기존선 구간에서 사용되며, 우리나라에서도 2002년부터 관련 프로젝트가 진행됨에 따라 호남선 송정리-함평 구간에서의 시험운행이 완료되었으며, 2008년부터 경부선과 호남선에 상업운행을 실시할 예정이다.

Level 2는 GSM-R(Global System For Mobile-

Railway)을 사용하여 열차의 운행을 제어한다. 이는 Level 1의 궤도에 설치된 발리스에 의한 정보전송을 GSM-R 무선 통신망으로 대체한다. Level 2를 사용한 최초의 상업 운행은 2004년 스위스에서 실시되었으며, 최근에 개통된 프랑스 TGV 동선에도 Level 2가 설치되어 프랑스와 독일의 고속 열차가 함께 운행되고 있다. Level 3은 열차제어시스템의 모든 기능이 무선에 의해 구현됨을 의미하며, 이는 Level 2의 성공 이후, 향후 무선과 정보 기술 개발 추이에 따라 구현될 미래의 열차제어시스템으로 언급된다.

(나) 도시철도의 경우

도시철도의 경우에는 역간의 운행 거리가 짧고, 대부분 동일한 유형의 속도 및 특성을 갖는 열차가 독립된 형태로 운행된다는 점에서 이미 앞에서 언급하였듯이 ATC/ATO, 또는 ATP/ATO의 개념으로 열차제어시스템이 정립되었다. 그러나 이러한 시스템의 구성 설비가 대부분 선로변에 설치됨으로서 운영 및 유지보수 측면에서의 개량 필요성과 운전 시적으로 주어지는 열차 운행 간격 최소화를 위한 무선의 사용이 긍정적으로 검토되었다<sup>4)</sup>. 특히 중·저속에서의 무선 시스템 활용은 열차제어시스템의 필수적인 사항으로, 이러한 개념은 무선에 기반을 둔 열차제어시스템



〈그림 11〉 CBTC 구성 블럭도

을 의미하는 CBTC(Communication Based Train Control) 시스템으로 발전하였다<sup>8),9)</sup>. 또한 ATC/ATO 또는 ATP/ATO는 선로변 설비에 의해 고정 구간에 따라 열차가 안전하게 운행할 수 있도록 열차 간격을 조정하는 고정 폐색(Fixed Block)을 사용하지만, CBTC는 유도 루프(IL: Induction Loop)를 사용하여 열차의 안전거리에 따라 열차 간격을 최소한으로 감소시킬 수 있는 이동 폐색(Moving Block)의 개념으로 기술을 변화시켰다.

#### 4. 차세대 열차제어시스템

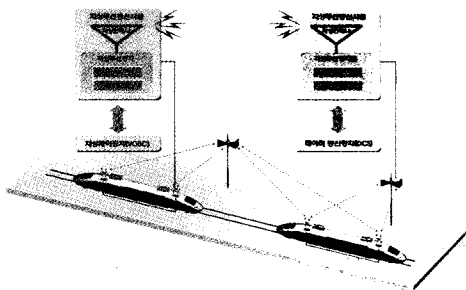
현재까지의 열차제어시스템 개발은 지상 설비의 최소화, 속도에 무관한 열차 제어 시스템, 열차제어 상호호환성을 위한 설비의 표준화 및 모듈화, 선로 용량과 운전시각 극대화 및 무선 시스템의 적용 확대 방향으로 정보기술의 발전과 함께 기술 변화가 추진되었다.

또한 지상 설비의 감소는 향후 선로변에서의 작업 안전, 운영 및 유지보수 인력과 비용 측면에서 표준화 및 모듈화는 물론, 무선 기술을 이용하여 지상에서 차량으로의 설비 이동이 가속화될 것으로 예상된다<sup>7)</sup>.

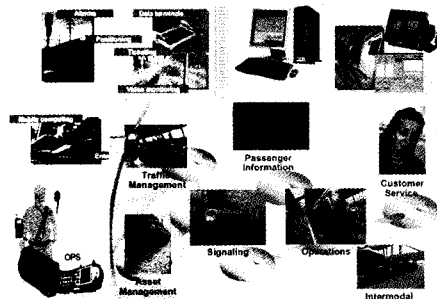
속도에 무관한 열차제어시스템에 대한 요구는

이미 100년 전부터 시작되었고, 현재는 기존선과 고속선이 병합된 ETCS와 도시철도용 CBTC로 분류되지만, 미래에는 속도 및 운영 환경에 무관하게 사용할 수 있는 무선 기반의 통합된 열차제어시스템이 활용될 것으로 기대된다. 이러한 시스템은 CBTC에 기반을 두고 개발될 것으로 예상되며, 무선에 의해 고밀도 운전, 고정밀 열차 위치의 검지, 연속적인 양방향의 차상-지상간 무선 데이터 통신, 수명주기 비용(LCC : Life Cycle Cost) 저감, 유지보수 인원 및 비용 감소, 고도의 안전성 및 신뢰성, 가용성, 및 유지보수성을 보장하는 무인, 자동화의 특성을 보유해야 한다<sup>4)</sup>.

무선 시스템의 사용 영역은 Non-vital로 주어지는 기존의 승객 정보 전송 및 감시에서부터 열차 운행에 필수적인 Vital 정보 전송까지 확장됨으로서 무선시스템의 보완 및 위성 시스템의 이용은 열차의 속도, 열차의 운전 시격에 무관한 최적의 열차제어시스템 구성에 있어서 필수적인 항목으로, 이는 단지 열차제어시스템에서의 무선 활용뿐만 아니라, 철도 시스템 주변 환경과의 호환에 있어서도 무선을 적용함으로써 보다 용이한 철도 교통의 가용성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 결과는 완전한 무인, 자동화 열차 운행은 물론 타 교통과의 연계 운행 등을 통해 철도 교통이 철도 운영처 중심의 철도 교통으



〈그림 12〉 미래 철도의 무인, 자동화 운영



〈그림 13〉 철도에서의 무선의 활용



로의 접근이 아닌 철도 교통 이용자 중심의 교통 시스템으로 타 교통과의 연계까지도 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

## II. 결론

열차 운행 속도 증가 및 운전 시력 감소는 열차 제어시스템에 있어서 안전성에 기반을 둔 자동화 및 무인화의 측면으로 발전이 진행되었다. 특히 정보 기술의 발전에 의한 철도기술의 발전은 기존의 차량 및 궤도 분야의 안전까지 열차제어시스템의 제어 영역으로 편입되고 있으며, 이러한 목적에 부합한 열차의 종류 및 속도에 무관한 열차제어시스템의 개발 및 표준화가 진행중에 있다. 따라서 향후의 열차제어시스템은 위와 같은 기본 개념을 바탕으로 무선 및 위성의 적극적인 활용과 관련 기반 연구가 다양하게 고속화, 무인화, 표준화, 단일화라는 개념 하에 안전성에 입각하여 추진될 것으로 예상된다.

### 참고문헌

- [1] <http://www.lgv-est.com>  
 [2] 21세기 범유럽 교통망에서의 철도의 역할, 김용규, 한국철도기술, 2004, 7·8월호, pp91-110  
 [3] 기존선 속도 향상을 위한 신호보안체계, 백중현, 김용규, 류상환, 한국철도기술, 2006, 9·10월호, pp26-33  
 [4] 한국형 도시철도용 무선기반 열차제어시스템 개발체계연구 보고서, 한국철도기술연구원, 2006.  
 [5] 도시철도 신호시스템 표준화, 김종기, 양도철, 정의진, 한국철도기술, 2006, 9·10월호, pp20-25

- [6] <http://www.csee-transport.com>  
 [7] <http://www.ertms.com>  
 [8] <http://www.alcatel-lucent.com>  
 [9] <http://www.tsd.org>

### 저자소개



김용규

1987년 2월 단국대학교 전자공학과 석사  
 1993년 9월 DEA in Control Engineering from  
 Institute National Polytechnique de  
 Lorraine, France  
 1997년 7월 Ph.D in Control Engineering from  
 Institute National Polytechnique de  
 Lorraine, France  
 1985년 3월-1989년 2월 단국대학교 조교  
 1993년 10월-1997년 7월 Researcher in Centre de  
 Recherche en Automatic  
 de Nancy, France  
 1997년 12월-현재 한국철도기술연구원 열차제어연구팀장  
 주관심 분야 : Automatic Train Control,  
 Communication Based Train Control