



## 도시철도 열차제어시스템 및 미래형 교통수단의 발전방향

■ 백종현, 윤용기, 이준호 / 한국철도기술연구원

### 1. 서 론

대용량 대중교통 수단인 도시철도의 운용에 있어 중요한 역할을 수행하는 열차제어시스템은 인명 및 설비의 안전을 위해 열차가 위험한 상황에 직면하지 않도록 지속적인 제어, 감시, 점검 등을 담당하고 있다. 또한 열차제어시스템의 중요한 사용 목적 중의 하나로, 열차 편성수를 최소화하고 운전시력을 단축시켜 승객 서비스와 경제적 효율성을 높이는 데 기여한다는 것이다.

국내 도시철도 열차제어시스템은 1974년 서울시 지하철 1호선 개통과 함께 점제어 방식의 ATS(Automatic Train Stop) 시스템이 최초로 사용되었으며, 이러한 ATS 시스템은 지상 레일 안에 설치된 지상신호발생장치의 속도 제한 신호에 의해 제한속도가 현시되어지며, 이를 확인한 운전자에 의해 열차의 가감속제어를 수동으로 수행하는 방식이다. 이후 연속제어방식을 이용한 ATP(Automatic Train Protection) 시스템이 도입되었으며, 이러한 ATP 시스템은 중앙집중제어시스템(CTC : Centralized Traffic Control)이 선형열차의 점유 상태 및 속도를 파악하여 사전에 설정된 속도코드 중에서 적합한 것을 선택하여, 궤도회로를 통해 후행열차에 전송하는 방법으로 열차의 안전운행을 지원하는

시스템이다. 이러한 ATP 시스템에 운전자의 최소한의 개입만으로 열차를 자동으로 운행시킬 수 있는 ATO(Automatic Train Operation) 시스템을 추가하여 현재 국내 대부분의 도시철도 노선에서는 ATP/ATO 시스템에 의한 1인운전을 하고 있다.

현재 국내 도시철도 열차제어시스템에서 보편적으로 사용되고 있는 ATP/ATO 시스템은 궤도회로를 이용한 열차제어시스템으로서 지상의 거점에 위치하는 제어장치가 각 열차의 위치정보를 주기적으로 수집하고, 선형열차의 위치와 선로의 속도제한을 고려하여 후행열차에 제한속도 정보를 전송하여, 차상 열차제어시스템에서 열차의 속도에 따른 가감속 제어를 수행하는 것이다. 이러한 궤도회로 기반의 ATP/ATO 시스템을 대신하여 1990년대 초에 개발된 방식으로 궤도회로를 이용하지 않고 무선을 이용한 열차제어시스템, 즉 CBTC(Communication Based Train Control) 시스템이 전 세계적으로 점차 적용이 확산되고 있으며, 국내에서도 한국철도기술연구원에서 도시철도 신호시스템 표준화 연구를 통해 CBTC 시스템에 대한 표준규격을 마련하였으며, 한국철도공사에서 분당선에 시범구축 사업을 시행하여 타당성이 있다는 결론을 얻은바 있고, 신분당선에는 CBTC 방식이 채택되어 완공 후 국내

에서도 최초로 운행될 예정이다.

앞에서 설명한 도시철도 열차제어시스템은 열차를 운행하는 과정에서 인명사상 및 시설물 파손과 같은 사고가 발생하는 것을 방지하는 Fail-Safe 시스템으로 동작한다. 이 같은 시스템을 구축·운영하기 위해서는 철도운행과정에서 발생할 수 있는 위험원 도출, 안전성 목표 수립, 리스크 대책설계 및 안전성 확인·검증과 같은 활동이 필요하며, 시스템의 구성은 컴퓨터 하드웨어기술, 유·무선통신기술 및 소프트웨어기술 등으로 구성됨으로서 안전성활동은 더욱 중요하게 작용한다. 이에 따라 철도선진국에서는 IEC61508/62278/62279, EN50126 /50128/50129 및 Yellow Book 등 안

전성활동에 대한 기준을 만들어 사용하고 있다. 국내의 경우, 안전성활동보다는 기능구현중심의 시스템개발에 집중한 결과 관련기술을 많이 확보하였지만, 시스템 수준에서 개발한 기술을 적용한 실적이 매우 낮은 상태이다.

본 고에서는 이러한 문제점의 원인을 분석, 해결하기 위해 한국철도기술연구원이 국내철도신호기업과 함께 진행중인 ESM(Engineering Safety Management)에 의한 도시철도 열차제어시스템 개발에 대한 현황 및 향후 전망에 대해 설명하고자 한다. 이와 아울러 미래형 교통수단의 하나로 주목받고 있으면서 세계 각국이 실용화에 노력을 기울이고 있는 수송시스템 중의

하나인 소형레도 차량 시스템(Personal Rapid Transit System)의 정의 및 특징, 세계 각국의 실용화 추세, 국내의 연구개발 현황 등에 대해서 간단하게 소개하고자 한다.

## 2. 국내 열차제어시스템 관련 연구개발실적

철도에 무선통신기술을 적용한 예는 열차제어시스템부분, 열차운행관리부분, 승객·고객서비스부분, 철도안전설비부분, 유지보수관리부분 등 다양하며, 적용부분은 지속적으로 많아질 것이다. 특히, 그림 1과 같이 무선통신을 기반으로 하는 열차제어시스템은 간선철도를 대상으로 하는 ETCS(European Train Control System)와 도시철도를 대상으로 하는 CBTC(Communications Based Train Control)시스템으로 구분 지을 수 있다.

국내에서도 한국철도기술연구원의 경량전철시스템기술개발사업, 한국철도공사의 지능형열차제어시스템 시범구축사업에 무선통신기반의 열차제어시스템(CBTC)을 적용하였고, 한국철도공사의 기존철도신호시스템 개량사업(ATP시스템 구축사업)에는 ETCS Level 1을 적용하였다. 또한, G7 사업을 통해 레

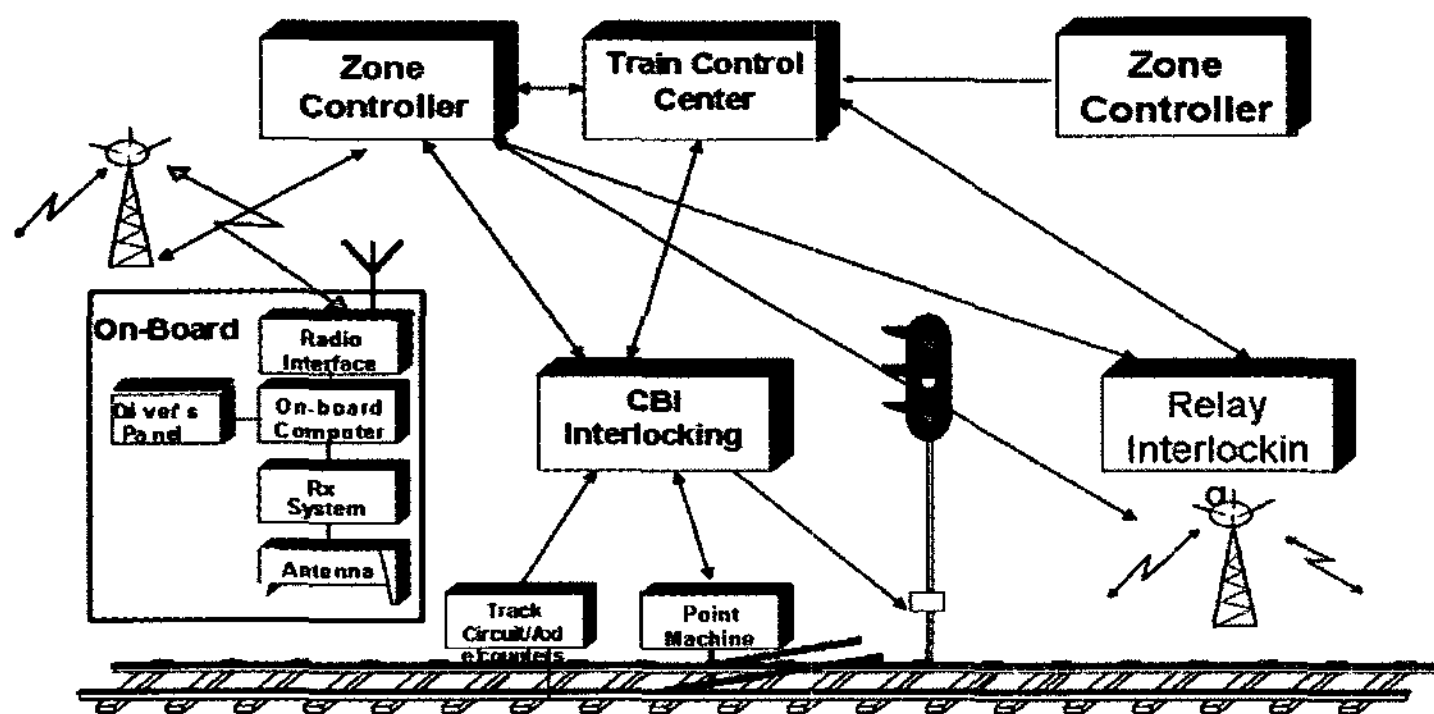


그림 1 무선을 사용한 열차제어시스템 구성도

표 1 열차제어시스템 기술확보 현황

	세부기술	필수기술	확보기술
SE	사양서 작성	✓	○
	인터페이스설계	✓	○
	시험 및 평가	-	○
ATS	이동폐색기반 열차운행관리	✓	○
	무인자동운전 열차운행관리	-	○
ATP/ATO	열차위치추적	✓	△
	이동폐색기반 열차간격제어	✓	△
	이동폐색기반 열차진로제어	✓	△
	실시간 열차상태감시	-	○
무선통신장치	통신장치 제작	-	○
	통신망 운용관리	✓	○



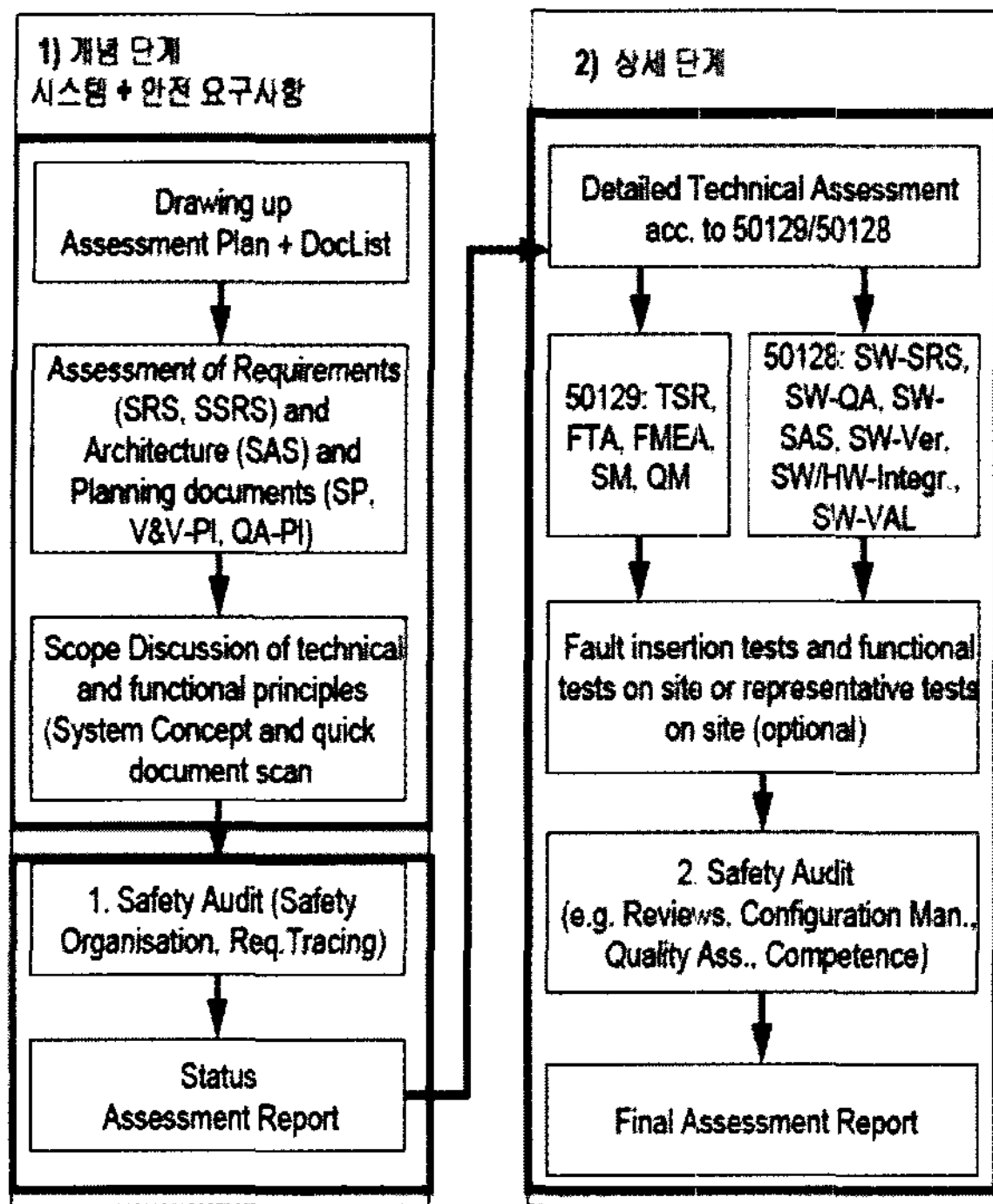


그림 3 안전성활동 내용 및 과정그림

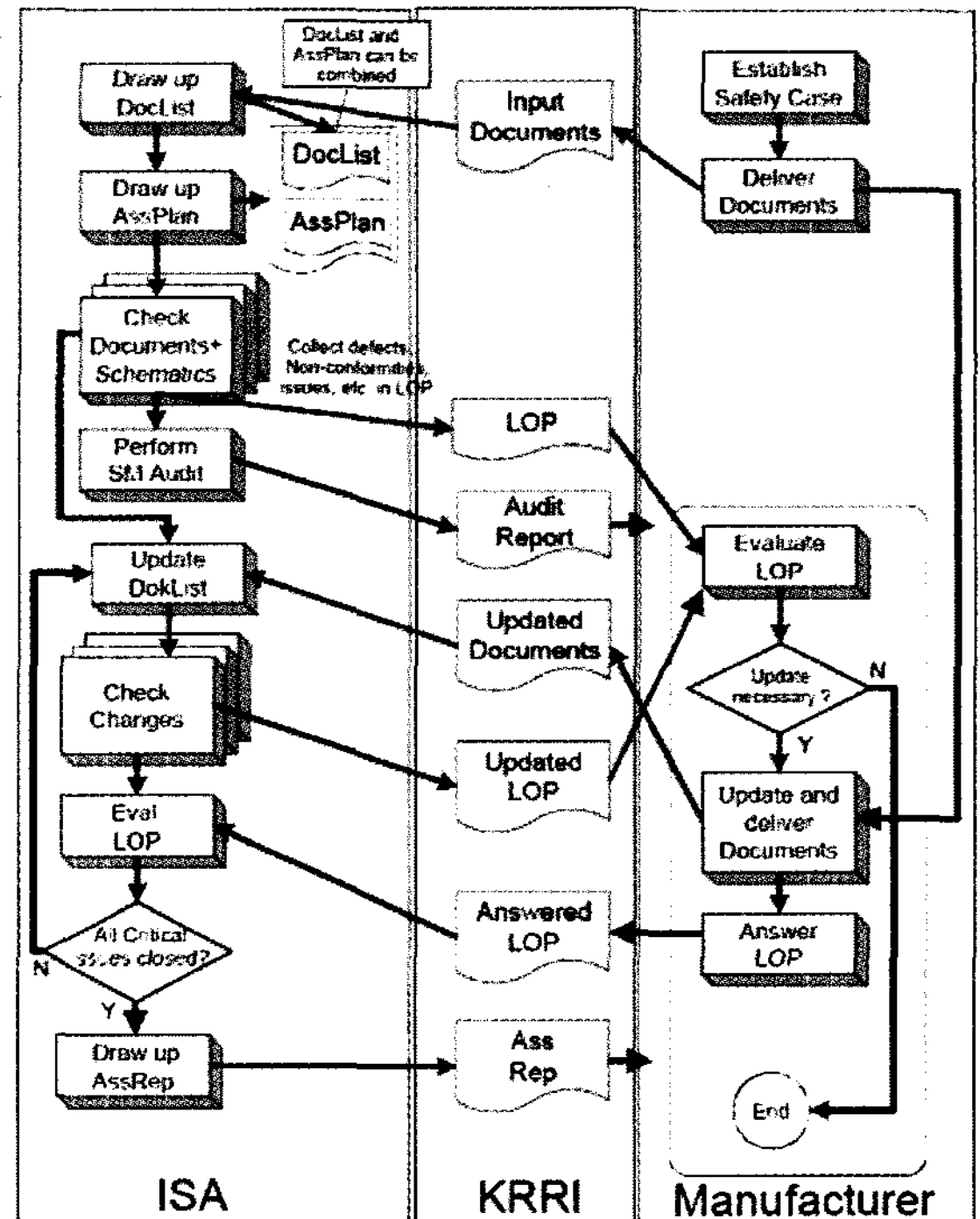


그림 4 안전성활동 담당업무 및 공정

### 3.2 열차제어시스템 개발사양서 작성

2007년에는 열차제어시스템 개념을 정의하는 것을 목표로 한국철도기술연구원은 14개 철도신호전문기업의 협조를 통해 열차제어시스템 개발사양서를 작성하였다. 그리고 안전성 활동계획에 따라 개발사양서(시스템요구사항서), 시스템 구성도, 시스템안전요구사항 등 몇 가지 문서에 대해서 ESM 전문기관의 확인 절차를 진행하였다.

현재까지 작성된 열차제어시스템 개발서의 내용을 요약하면 다음과 같다.

#### (1) 열차제어시스템의 특징

- 궤도회로를 사용하지 않으면서 열차위치를 높은 정밀도로 검지함.
- 높은 신뢰성을 확보한 연속적이고, 차상-지상간 양방향 무선데이터통신
- 차상장치 및 지상장치에서 vital기능 처리
- 무인자동운전(driverless)

#### (2) 열차운전모드

무인자동운전(driverless)을 포함하여 다음 5가지의 열차운전모드를 지원한다.

- 무인(driverless) 자동운전모드
- 자동운전모드
- 수동운전모드
- 비상운전모드
- 기지운전모드

#### (3) 폐색설정

열차제어시스템의 안전간격확보 및 진로제어를 위한 폐색을 설정한다. 진로제어구간인 역, 정차장, 차량기지 등에 가상폐색(virtual block)을 설정하는 방법과 안전간격을 확보해야 하는 역과 역 사이에 이동폐색(moving block)을 설정하는 방법으로 구분한다.

기존에 운용하고 있는 전자연동장치의 진로제어알고리즘을 최대한 활용하기 위해서 역내, 정차장, 차량기지 등은 여러 개의 가상폐색을 설정한다. 선행열차와 후속열차간 안전간격제어를 담당하는 ATP는 이동폐색을 토대로 하여 열차간격제어를 한다. 신호기의

설치는 열차진로제어구간으로 한정하며, 열차속도제어용으로 사용하지 않는다.

(4) 열차제어시스템 구성 및 기능

열차제어시스템은 그림 5와 같이 ATS, ATP(지상/차상), ATO(차상), 연동장치 및 무선통신장치로 구성되며, 각 구성장치별 기능은 다음과 같다.

(가) ATS

: 열차확인 · 열차추적 · 열차삭제 / 사용자 인터페이스 / 열차시각표(열차운행스케줄) 관리 / 열차 운행계획관리 / ATS제어모드 전환 / 열차 운행의 제한 / 자동열차조정 / 열차속도제어 / 열차진로설정 / 역 정차기능 / 선로전환기 단독제어 / 열차출입문 개폐제어 명령전송 / 수동인칭제어명령전송 / 열차원격제어 / 승객정보시스템 인터페이스 / 구원열차편집 / 운전자승무관리 / 성능저하 시 대체 열차편성 / 구간운전 / 차량기지 자동입출고 / 장애 보고

(나) ATP

: 열차위치 및 열차속도 결정 / 열차안전간격 / 열차 과속방지 및 제동보장 / 임시속도제한 / 수동모드 속도제한 / 열차구름방호 / 궤도(또는 선로)종단에서의 열차보호 / 열차관리 / 열차상태정보 전송 및 현시 / 열차편성분리보호 및 열차분리 · 결합 / 영속도 검지 / 열차출입문 제어 및 확인 / 플랫폼 스

크린도 제어 / 열차출발연동 / 비상제동 해제 및 열차이동허가 / 진로연동 / 열차추적실패 시 방호 / 열차운전모드변경 / 열차운전방향(운전대선정) 전환 / 제어영역관리 / 운전자확인 및 정보제공 / 구원운전 / 에너지 최적화운전 / ATP정보 보고 / 진단기능

(다) ATO

: 자동속도조절 / 정위치정차 / 인칭제어 / 열차출입문 제어 / 지상-차상간 인터페이스 / 열차내 장치 제어 / 운행중인 열차확인 / 자기진단기능

(라) 연동장치

: 진로요청 / 진로설정 및 쇄정 / 진로보장(route proving) / 진로해정 / 열차제어시스템과의 연동

3.3 인프라 확보

2008년도는 열차제어시스템 개발사양서를 토대로 열차제어시스템의 핵심기술인 열차검지기술, 열차안전간격확보 및 열차속도제어 등에 대한 설계서를 작성한다. 동시에 열차제어시스템 검증인프라를 확보하기 위한 활동을 장기적으로 수행한다.

현재까지의 연구개발은 차량시스템의 성능검증에 집중되었기 때문에 개발한 열차제어시스템을 검증하는 것이 충분하지 않다. 개발한 열차제어시스템을 검증하여 실용화하기 위해서는 열차핵심요소기술에 대한 기능검증 및 열차제어시스템의 성능검증을 실시하는 것이 필요하다. 기능검증은 열차위치검지, 열차안전간격, 열차속도제어, 열차진로제어, 무선통신망운용 등의 기능을 주요 대상으로 하며, 성능검증은 열차제어시스템의 안전성, 신뢰성, 가용성 등을 주요 대상으로 한다.

특히, 열차위치검지정보를 바탕으로 열차안전간격과 열차속도제어를 점검하기 위해서는 충분한 선로길이와 함께 다편성의 열차를 투입하는 것이 필요하다. 이러한 다편성 열차, 충분한 시험선로, 안정적인 전력공급 등의 요건을 확보하고 운용하기 위해서 관련 기관의 협조와 지원이 절대적으로 필요하다.

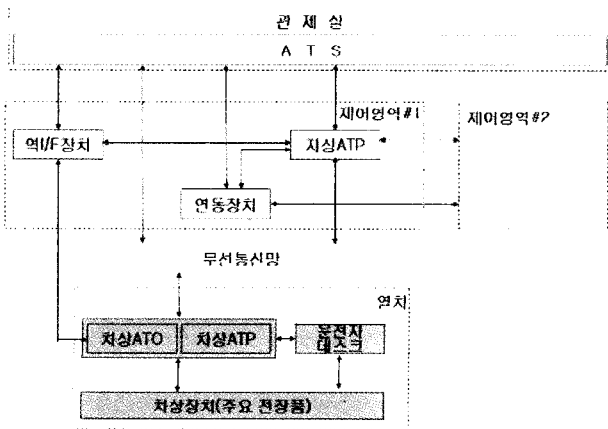


그림 5 열차제어시스템 구성도



이에 국토해양부와 한국건설교통기술평가원에 「도시철도 신호시스템 인증체계 구축」을 2007년도에 요청하였으며, 2008년도에 인증체계 구축의 타당성연구에 적극적으로 참여하여 이를 국가연구·개발사업화를 추진하고 있다. 이것은 열차제어시스템을 안정적으로 검증하기 위한 인프라를 구축하며, 국내 철도신호산업의 역량을 획기적으로 높이는 계기가 될 것이다.

#### 4. 소형궤도차량 시스템의 발전방향

소형궤도차량시스템(Personal Rapid Transit : PRT)은 소형전철(Small Rapid Transit : SRT) 또는 통칭해서 APMs(Automated People Movers)라고도 불리며, 총연장거리가 1~10km, 시간당·방향당 3,000~10,000명 정도를 수송할 수 있는 시스템으로써 본고에서는 중소형시스템(Group Rapid Transit : GRT)까지 포함하여, 승객요청(On Demand)에 따라 운행되며 수송용량은 대략 차량당 1~20명을 수용할 수 있는 교통수단으로 정의한다. 이전에는 시스템의 개념자체가 불분명하였을 뿐만 아니라 초창기 시스템에 대한 검증이 원활하지 못했고 기존 교통체계의 변화에 대해서 수동적이었던 상황이 PRT를 대중화하는데 실패한 하나의 요인으로 작용하였다. 이에 첨단교통협회(Advanced Transit Association)에서는 불분명한 PRT의 개념을 표준화하기 위해 1988년 PRT시스템에 대한 지침서를 만들어 제시하였는데 그 기준은 다음과 같다.

- ① 완전무인자동운전인 궤도 차량
- ② 24시간 이용할 수 있으며, 1인 또는 소그룹으로 독립적인 이용이 가능한 소형차량
- ③ 고가, 지상, 지하에 건설할 수 있는 소형 궤도
- ④ 복선화된 네트워크에서 모든 궤도와 역을 이용할 수 있는 차량
- ⑤ 출발지에서 목적지까지 환승이 필요 없는 Non-Stop 운행
- ⑥ 고정된 스케줄보다는 수요에 따라 서비스를 공급하는 시스템

#### 4.1 소형궤도차량 시스템의 특징

소형궤도차량시스템이 지닌 특징은 넓게 보면 신속성, 편리성, 경제성 및 친환경성으로 볼 수 있다. 즉, 안전성과 신뢰성을 바탕으로 승객을 신속하고 편안하게 목적지까지 무정차로 이동시키며, 시공 및 유지 보수가 용이하여 공사로 인한 공해나 교통흐름의 방해가 적고, 저공해 에너지의 사용과 재활용 가능한 소재의 사용으로 친환경적이다.

##### (1) 신속하고 편리한 도심 이동수단

- ① On-Demand Service
- ② 갈아 탈 필요가 없는 대중교통수단
- ③ Privacy의 보장
- ④ 사계절 24시간 운행
- ⑤ 저렴한 설치비, 용이한 노선확장
- ⑥ 접근이 쉬운 역
- ⑦ 기존 건물의 내부에 정류장 설치 가능
- ⑧ 단위시간당 높은 수송능력
- ⑨ 극대화된 안전성

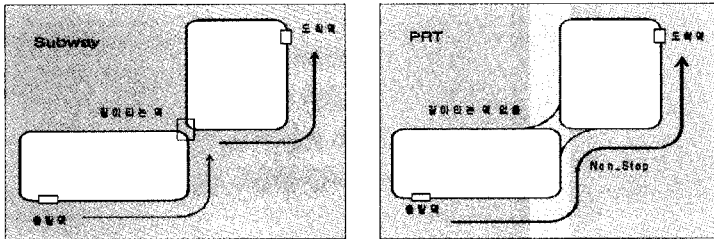
##### (2) 경제적인 이동수단

- ① 짧은 건설 기간: 건설기간의 단축으로 교통 및 환경적 비용소모가 적다.
- ② 저렴한 건설비: 경량구조물이 지상에 건설됨으로 지하철대비 매우 저렴하다.
- ③ 용이한 노선확장: 시공이 용이하여 노선확장이 쉽다.
- ④ 승강장 건설의 용이: 기존의 건물을 이용할 수 있어 승강장건설이 용이하다.

##### (3) 친환경적 이동수단

- ① 저공해: 전기와 같은 저공해 에너지의 사용으로 공해가 적다.
- ② 건축 폐기물 배출 감소: 철재와 같은 재활용 소재의 사용으로 친환경적이다.
- ③ 환경공해 감소: 건설시 단기의 공사기간으로 여러 가지 공해를 줄일 수 있다.

다음의 그림 6은 기존의 도시철도에서와 같이 환승에 따른 불편함을 PRT가 갖고 있는 특성들 중의 하나인 출발지에서 목적지까지 무정차 운전 특성을 이용해서 해소할 수 있음을 보여주고 있다.



(a) Line Haul 시스템의 노선변경 (b) 소형궤도열차 시스템의 노선 변경

그림 6 Line Haul 시스템과 소형궤도열차시스템의 노선변경 방법 비교

#### 4.2 소형궤도차량 시스템의 기능 및 역할

- (1) 대중교통체계에서의 소형궤도열차 시스템의 대중교통체계기능
- ① 대규모 교통시설간 효율적인 연계
- ② 지선교통체계와 간선교통체계간의 연결
- ③ 중심업무지구내 일정 범위 안에서 의 지역적 연계
- ④ 위락시설간 연계교통수단으로 활용

표 2 국외 시스템들의 특징

	Skyweb Express	ULTra	Vectus	Cabintaxi KK3
항목				
추진	이중화, 내장식, single-sided 선형 유도 모터	회전 전동 모터 구동 타이어	유도로상에 설치된 Single-sided 선형 유도 모터	이중화, 내장식, double-sided 선형 유도 모터
주동력	600V DC 내부 유도로 전기 레일	재충전식 배터리	자체 발전기	500 V AC 내부 유도로 전기 레일
보조 동력	배터리	배터리	배터리	배터리
추진 제어	이중화 자체 가변 주파수 구동	자체 제어기	LIM당 트랙 제어	자체 인버터 제어기
브레이크	LIM 브레이크 및 전기 비상 브레이크	타이어/유도로 인터페이스의 전자유압 브레이크	LIM 브레이크, 영구자석 형 브레이크, 전자 유압식 비상 브레이크	LIM 브레이크, 전자 유압식 비상 브레이크
제어 방식	비동기식 분배 제어 시스템	동기식 집중 제어 시스템	비동기식 분배 제어 시스템	비동기식 분배 제어 시스템
조향 메카니즘	상호작용식의 차량/노변 제어	독립된 차량 센서	상호작용식의 차량/노변 제어	상호작용식의 차량/노변 제어
차량 통신	유도 케이블 트랜스미버	무선 네트워크	다중 무선 네트워크	유도 케이블 트랜스미버
정차역 운영	노선을 따라 순서대로 또는 여러대가 동시에	노선을 따라 순서대로 또는 여러대가 동시에, 또는 그냥 지나침	노선을 따라 순서대로 또는 여러대가 동시에	노선을 따라 순서대로 또는 여러대가 동시에
최소 차량간격	0,5 sec	2 sec	2,5 sec	0,5 sec

표 3 한국철도기술연구원의 연구개발 수행 내용

(단위 억)

과제명	사업명	과제최종 목표	사업 수행기간	중요사항
소형궤도차량 극소 간격 제어 기술 개발	공공기술연구회 → 정책연구사업	최소운전시격 0.5[sec]의 소형궤도 차량 극소간격 제어기술개발	2004. 07 -2005.07 (1차년도 수행 후 종결)	- 0.5[sec]의 짧은 운전시격에 의한 구간별 운행 제어 기술개발 - 0.5[sec]의 운전 시격으로 인한 차량간의 충돌을 허용하는 제어 알고리즘 개발
소형궤도열차 시스템 엔지니어링 기술개발	건설교통부 → 차세대 첨단 도시철도시스템 기술개발 사업	시스템 엔지니어링 기술 개발에 의한 시험선 건설을 통해서 개발된 요소 기술의 검증	2005.07 - 2006. 04 (1차년도 수행 후 보류)	- 시스템 엔지니어링 기술 개발 - 시험선 건설 - 최상위 수준의 운영제어 프로그램 개발
소형궤도차량 운행제어 기술 개념설계	한국철도기술연구원 → 기본연구사업	소형궤도차량 운행제어 시스템 핵심 기술연구	2007.01 - 2011.01 (현재 연구 수행 중)	- 하위 수준의 구현 가능한 차량운행제어 알고리즘 개발 - 검증 시스템 개발
수요자 요구(On-demand) 대응 대중교통수단 (PRT/GRT) 개발	한국철도기술연구원 → 기획과제	On-demand 시스템 기술 확보	2008.01 - 2009.01 (현재 연구 수행 중)	- On demand 제어 방식에 대한 시스템 레벨에서의 성능 및 운영 효율성 검토

(2) 소형궤도열차시스템의 대중교통체계 역할

① 도시 내에 궤도교통수단이 없는 지역에서는 중심 업무지구를 중심으로 외곽지역으로 점차 확장시키고, 현재 철도가 운행되는 도시 내에서는 접근교통수단으로서 소형궤도열차시스템의 적용이 가능

② 뚜렷한 지역적 특색이 없는 지역은 소형궤도열차시스템의 도입으로 지역 이미지 개선에 일조

4.3 소형궤도차량 시스템의 기술개발 현황

(1) 국외

국외의 대표적인 소형궤도차량 시스템들로는 미국의 Skyweb Express, 영국의 Ultra, 독일의 Cabintaxi 등이 있으며 한국의 포스코가 영국에 법인을 설립한 Vectus가 있다. 이들 중 영국의 Ultra 시스템은 영국의 히드로 공항 터미널과 공항 주차장을 연계할 수 있는 교통수단으로 선정되었으며 2009년 봄 시스템구축을

완성하고 운전을 시작할 예정으로 있다. 이들 시스템의 특징은 다음의 표 2와 같다.

(2) 국내

한국에서는 한국철도기술연구원이 주도적으로 PRT 연구개발에 참여하고 있으며, PRT 차량 운행 제어기술 개발, 무인차량 운행제어 시나리오 개발 등 앞으로 주목 받게 될 신 교통 시스템의 시장 수요에 대응해서 PRT 관련 요소 기반기술의 확보에 노력하고 있다. 다음의 표 3은 한국철도기술연구원에서 2004년 이후로 지금까지 수행하고 있는 PRT 관련 연구개발 과제를 나 타낸다.

5. 결 론

기존에 수행된 열차제어시스템 연구개발의 문제점을 분석한 결과를 토대로 안전성활동을 중심으로 한



