

차상 ATC/ATO/TWC 시스템의 열차 자동운전 구현의
현차시험 결과고찰
A Study for Running Test Result of Train Automatic Driving
Control by ATC/ATO/TWC System

강 리택*, 이 종성**, 김 경식***, 박 계서****
KANG, LEE-TEAG LEE, JONG-SEONG KIM, KYOUNG-SHIK PARK, GYE-SEO

ABSTRACT

ATC/ATO/TWC System is the used for the train operation instead of drivers. It is interfaced with train, train equipment, wayside facilities. In this paper described configuration signaling system, construction of signaling system software and structure of system safety. This paper describes the method of performing automatic driving by ATC/ATO/TWC. Also, reported test result for mainline static test and mainline running test.

1. 서 론

철도 차량의 자동화, 대량 수송화에 따른 차량 신호보안장치의 안전성, 신뢰성 확보의 중요성은 점차 증가 하고 있다. 또한 종래의 고정 폐색 방식의 지상 중심의 열차 운행 제어는 점차 이동 폐색방식의 차상 중심 열차제어라는 기술적 변화에 따라 차상 신호장치의 중요성은 점차 확대되고 있다. 이에 차상 ATC/ATO/TWC 시스템 개발에 있어 안전성, 신뢰성을 확보한 실제 시스템의 설계, 제작 후 서울시 6호선 전동차에 탑재 한국철도차량 창원공장 및 서울시 6호선 본선 구간에서 시험하여 자동운전 구현에 따른 실제 차량에서의 신뢰성 및 안전성을 검증하였다.

* 한국철도차량(주) 중앙연구소 주임연구원, 비회원

** 한국철도차량(주) 중앙연구소 주임연구원, 정회원

*** 한국철도차량(주) 중앙연구소 주임연구원, 비회원

**** 한국철도차량(주) 중앙연구소 수석연구원, 정회원

2. 자동운전에 따른 신호 시스템 구성과 안전성 확보

현차시험을 통한 자동 및 무인운전의 구현은 ATC/ATO/TWC의 3 가지 하위 시스템을 기반으로 하여 행하여지는 각각의 기능의 연계로서 이루어진다.

즉, 자동 열차 제어 및 보호 기능의 ATC(Automatic Train Control) 시스템, 자동 열차 운행 기능의 ATO(Automatic Train Operation) 시스템 및 차상-지상간 통신 기능의 TWC(Train to Wayside Communication)시스템이 그것이다.

ATC/ATO/TWC의 설계에 대한 구성 요건 및 인터페이스 구성은 서울시 5,6,7,8호선 사양 요건과 건설교통부 고시에 근거한 것이며, 이에 맞게 구현되었다.

2.1 자동운전에 따른 신호 시스템 구성

자동 및 무인운전을 수행하는 과정에서 ATC 시스템은, 운전 중 발생 할 수 있는 결함은 검출 가능하게 하고, 이러한 결함은 보다 제한된 상황으로 이끌어지게 하는 안전 관련 기능들을 구현한다. ATO 시스템은, 차량 운전자를 대신하여 일반적으로 수행되는 자동 운행의 기능을 포함한다. TWC는 모든 열차와 지상간의 통신 및 지상과 열차간의 통신 기능을 내포하고 있다.

계속적인 자동 및 무인 운전을 위하여 신호 시스템은, 지상장치와의 인터페이스를 기본으로 하여, 차량과의 인터페이스를 통해 자동운전에 따른 각 상태별 판단의 근거를 인지하며, 자동운전 기능적인 요건들을 만족시킬 수 있도록 아래와 같이 설계/제작 되었다.

▣ 자동 및 무인 운전에 따른 지상장치와의 인터페이스 기능

- 전체 구간에서의 단방향 인터페이스 기능
 - ▶ 속도 코드 수신 및 해석
- 전체 구간에서의 양방향 인터페이스 기능
 - ▶ 없음
- 일정 구간에서의 단방향 인터페이스 기능
 - ▶ ATO MARK 신호 수신 및 해석
- 일정 구간에서의 양방향 인터페이스 기능
 - ▶ FSK 송수신 및 해석

▣ 자동 및 무인 운전에 따른 차량과의 인터페이스 기능

- 차량 상태 정보 인터페이스 기능
 - ▶ 주행 속도 검출

- ▶ 정지 상태 검출
- ▶ 전동 검출
- ▶ 차량 감속율 검출
- 차량 제어 정보 인터페이스 기능
 - ▶ VITAL INPUT 인터페이스
 - ▶ VITAL OUTPUT 인터페이스
 - ▶ 통신 정보 인터페이스

▣ 자동 및 무인 운전에 따른 차상 신호 장치 고유 기능

- 열차 보호 기능
 - ▶ 과속 감지 및 보호
 - ▶ 출입문 제어
 - ▶ 이중계 구성
 - ▶ 이상 상태 출력 금지
- 자동 운전 기능
 - ▶ 자동운전 상태 결정
 - ▶ 추종 Target 모델 결정
 - ▶ 자동 속도 제어

2.2 자동운전에 따른 신호 시스템 안전성 확보

자동운전 중 발생될 수 있는 위험요소 들은(신호 시스템 고장, 차량 고장 등) 운전자가 인식하고 대응하는 것은 극히 어려운 일이며, 이런 돌발 사태들에 대하여 불안정한 상태로의 천이는 최소화 하여야 한다.

즉, 시스템 안전 개념 중 기본적인 원칙은 자동운전 중 시스템 내의 특정 장애 혹은 오 동작이 발생하더라도 어떠한 불안정한 조건이 발생하지 않도록 하고 그러한 불안정한 조건의 발생의 가능성이 허용 가능할 정도로 충분히 작아지도록 하는데 있다.

이러한 설계의 목적은, 장애 발생시 장비에 대한 손상, 승객 혹은 승무원의 인명 손실을 배제하는 예측이 가능한 반응 상태를 가지는 시스템을 생산하는데 있다. 이를 위해, ATC/ATO/TWC 시스템은 최대한 예상치 못한 상태나, 원하지 않는 상태로의 상태 천이가 발생하지 않도록 최고의 안전성을 고려하여 설계된다.

첫째, 하드웨어적 시스템 구성 요소들은, 예상이 가능한 장애의 모델 및 수 차례의 타 프로젝트에서 보고된 이상상태의 모델을 기본으로 하여 각종 하드웨어 설계 시 입력 및 출력 시 1/2 차 회로의 분리, 각 회로 부분의 상태가 가능한

부품들에 의존하는 전통적이고 입증된 기술들을 이용하여 설계되며, 주요 요소들은 공식화된 안전성 분석 기법을 거쳐 단일 지점 장애 혹은 다중 결함 발생 등에 대해서도 항상 일정 수준 이상의 시스템 레벨 출력을 내도록 검증된다.

둘째, 소프트웨어적 시스템 구성 요소들은 개발된 시스템의 하드웨어적 디바이스의 생성 및 처리를 담당하는 소프트웨어로서 개발된 시스템에 가장 최적화 시켜 시스템의 각종 디바이스들이 가장 안전하고 효율적인 동작을 구현할 수 있도록 하며, 소프트웨어에서 사용될 hardware 적 구성을 지정하고, 프로그램내에서 운용될 데이터 및 입/출력 반응 및 중요 시간 값, 이상 상태 시 각 변수들의 안전한 상태로의 천이를 지정하도록 한다.

프로그램 연산이 처리되는 경우 각종 입/출력 데이터 및 계산 결과는 미리 약속된 상호 검사 규칙에(cross check) 따라 각 데이터의 신뢰도, 적절성을 감시하며, 만약 연산 또는 그 결과치 들이 부정확하거나 상호 검사 규칙에서 기대하는 값들과 위배되거나 신뢰성, 적절성을 확보하지 못한 경우 시스템은 고장으로 처리하거나, 그 값들을 무효화, 배제하게 된다.

셋째, 시스템운용에 있어 안전성은 우선 bus 방식에서는 이미 여러 가지 산업용 응용에서 안정성이 입증된 방식을 채택하고, 또한 CPU와 각 slave board 간의 특정한 상호 인식 명령을 코드화하여 데이터 및 slave 보드의 선택에 있어 오인을 방지하며, 각 slave 보드의 상태를 교환함으로써 slave board 중 이상이 있을 시 일부 기능 또는 시스템 전체를 방어 할 수 있는 기능을 구현한다.

출력에 대하여는, 별도의 독립적인 장치인 CPS(Conditional Power Supply)가 시스템 출력에 대한 전원을 유지하는데, 주기적이고 지속적인 CPU의 감시가 수행되지 않거나, 입력 전원의 이상을 감시함으로써 정확하게 동작하고 있음을 검증한다.

Vital 입력 및 출력은 현재의 상태를 검지하고, control bit를 사용하여 입/출력 회로의 개방/단락을 시험 함으로써 현재 상태의 입/출력 상태를 검증한다.

입력 및 통신 데이터에서 나타날 수 있는 noise의 오인식을 방지하기 위하여 입력 자체에 대한 검증은 하드웨어 자체 및 디바이스 처리 프로그램에서 보완 장치가 마련된다.

시스템의 안전성을 항상 시키기 위해, 매 시스템 주기마다 실제 입출력 연산

과 점검 연산이 항상 실행된다.

2.3 자동운전에 따른 자동운전 기능의 구현

1) 자동운전 상태결정

ATO 운행의 설정 또는 해제 여부, Target Route 의 설정, 재설정, 유효화 및 무효화를 통해 자동운전을 위한 대기, 설정, 출발여부, 주행여부, 도착여부 등을 계속적으로 감시하여 제어상의 하위 기능들의 자동운전을 위한 제어 동작을 지시한다.

상태 결정에 관한 모든 기능들은 철저히 상태 천이의 개념으로 판단하게 되고, 원하지 않는 상태로의 천이를 방지하고, 이들 논리적인 판단의 근거는 Boolean 대수로서 검증 하도록 하였다.

2) 추종 Target 모델

가용 추진력, 주행저항, 구배저항 등을 고려한 기본적인 주행 방정식을 기본으로 설계되며,

$$(1 + \lambda m)(M + m)(ds^2/dt^2) = T - R - (M + m)gi$$

현재 열차의 진행 절대 좌표 지점을 S present, 속도가 변화되는 좌표 지점을 S1, S2,Sn로 정의 하면 단위 거리별로 S1 에서의 거리와 속도를 기준으로 한 감속 pattern 이 생기며, 그 최대 제한값은 열차의 최고속도를 기준으로 하여 정한다. 즉, 열차의 가용 β (감속도)를 유지하며 감속했을 경우의 각 단위거리별로 생성한다.

$$V \text{ reference} = \text{SQR} (V \text{ target1} ** 2 + 2 * \beta * (S \text{ present} - S1))$$

3) 자동 속도 조절

필요 역행/제동력 산출에 있어서는 target speed 는 차량속도와 비교하여, 역행/제동이 결정되며 현재의 차량속도에서 가용 할 수 있는 최대 역행/제동력을 구하고 현재속도에서 발생시킬 수 있는 최대 propulsion/brake force 와 비례 되는 퍼센트 값을 계산하게 된다. 가속의 경우 가용 propulsion force 와 비교하지 않고 제어하더라도 제어특성에는 큰 영향을 주지 않으며, 가용 brake force 의 경우에도 전 속도대별로 동일한 가용 brake force 를 가지므로 최대 추진/제동력을 사용한다.

4) 기타

이러한 일련의 자동운전을 수행하는 열차 제어 과정에서 동력학적 모델을 설정하는데 있어 열차를 하나의 질점으로 보고 해석하게 되지만 실제 열차의 상황을 본다면 몇 개의 질점이(단위 열차) 스프링 과 댐퍼(연결 부위)로 구성되며 이들 각각의 변위점에서의 힘의 변위량, 변위 방향 등은 동력차와 객차의 연결 방법, 배치, 구성등에 따라 다양한 반응으로 나타나게 되는데 ATO 자체에서는 이들 요소에 의해 파생되는 출발/ 정지/ 주행 중 가감속 시의 충격이나, 저크 제어는 어렵다.

즉 그런 요소들을 인지 할 수 있는 근거 데이터를 수집하고, 제어하는 것은 어려움이 따르며, 이런류의 제한 및 제어는 TCMS / INVERTER / BRAKE CONTROLLER 등에서 그 역할을 담당 하고 있다.

그러나 ATO 장치는 TCMS / INVERTER / BRAKE CONTROLLER 장치들의 제어 형태나 양상들을 반드시 고려하여 목표속도/가속도 설정, 추종 속도/가속도 선정에서 반영하여야 한다.

3. 현차 시험 및 결과 고찰

3.1 현차시험 환경

현차시험은 한국철도차량(주) 창원공장 시운전 선로 및 서울시 지하철 6호선 본선구간에서 시행하였으며, 열차의 운행은 4개의 운전 모드와 1개의 차단모드로 시험을 진행하였다. 또한 공차 및 만차상태에서 정지 상태 및 각 운전모드별 주행시험을 수행하였다.

3.2 정지 및 주행 상태 시험

현차시험중 정지 상태 시험은 자동운전을 위한 기본적인 인터페이스 기능들의 확인 시험들로 구성되며, 속도 코드 수신 및 해석, ATO MARK 신호 수신 및 해석, FSK 송수신 및 해석, 주행 속도 검출, 정지 상태 검출, 전동 검출, 차량 감속을 검출, VITAL INPUT 인터페이스, VITAL OUTPUT 인터페이스, 통신 정보 인터페이스등에 대하여 각각의 인터페이스 기능들을 시험을 수행하였다.

주행 상태 시험은 각 운전 모드별 운행을 시험하며, 이는 초기화를 통한 각 운전모드 설정, 운전모드 해제, 운전 모드별 역간 운전, 운전 모드별 과속 검지 및 보호 기능, 출입문 제어에 대한 검증을 기본으로 하여 시행하였다.

3.3 자동 및 무인 운전 시험

현차 시험 중 자동 운전을 기본 운전 모드로 하여 시행 하였고, 설계 기준인 정위치 정차점 기준 +/- 350mm 이내에 정차하도록 튜닝 되었다.

또한, 자동운전 상태 결정의 검증은 5000 회의 역간 운전 초기화, 역간주행, 정밀정차 및 출입문 연계 동작 시험을 통해 검증 되었다.

다음의 그림 1은 자동운전으로의 상태 천이 및 자동운전 상태 결정의 절차를 나타

낸 것이다.

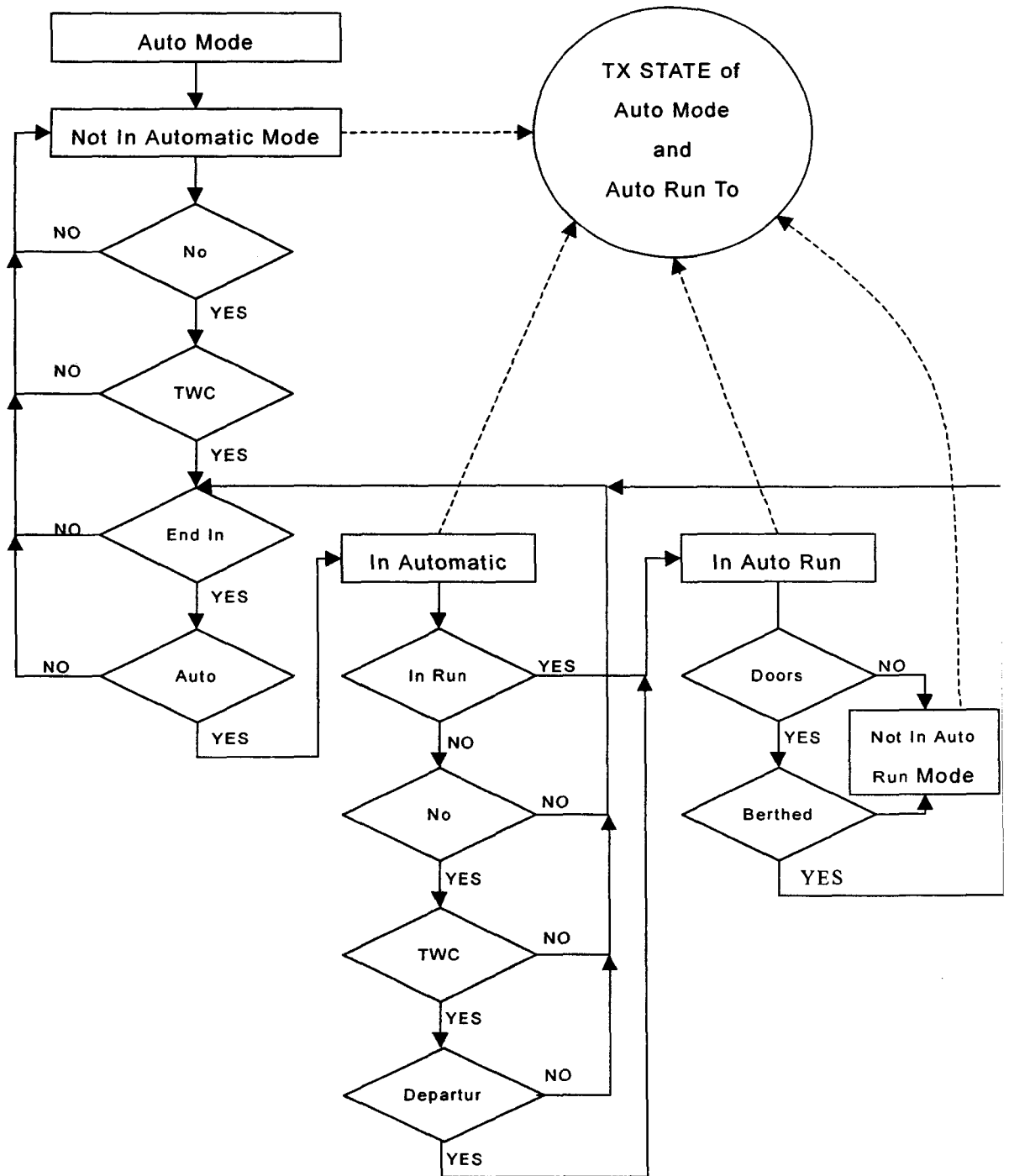


그림 1. 자동운전 Procedure

그림 2는 역간 운전에서의 주행상태를 측정 한 것 이다.

그림 2에서 나타난 것과 같이 지상 속도 코드 및 track data 정보를 이용하여 산출된 target speed 를 따라 제어되고 있는 있음을 통해 추종 Target 모델을 형성됨을 보여준다.

또한, target speed 와 현재 열차 속도와의 차이에 의해 조절되는 추진/제동력의 변화로 target speed를 추종하여 자동 속도 제어를 하고 있음을 보여준다.

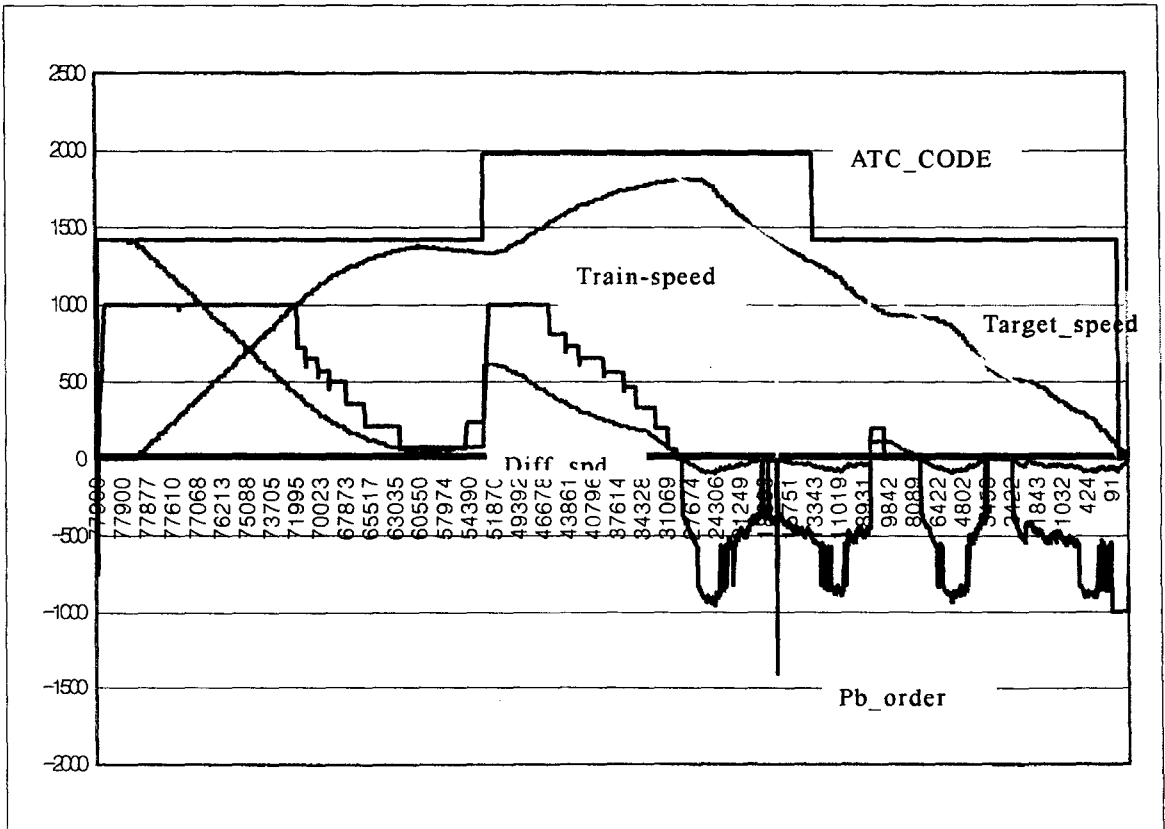


그림 2. 역간 자동운전 주행시험

4. 결 론

본 논문에서는 자체 개발한 차상 ATC/ATO/TWC장치의 자동운전 구현에 대하여 기술하고, 현차시험을 통하여 자동운전에 따른 안전성 및 신뢰성을 검증하였다. 6호선 본선에서의 현차 시험을 통한 튜닝 및 적용으로 철도차량의 자동/무인 운전을 위한 차상 신호 시스템에 대한 국산화가 가능 하도록 그 토대를 마련하게 되었으며, 기존 전동차 및 향후 프로젝트에 적용 가능함을 검증하였다.

앞으로, 차상 신호 장치의 신기술 개발에 지속적으로 추진할 계획이다.

참고문헌

1. 한국 철도차량(1999), SMG 6호선 ATC/ATO/TWC System Description
2. 한국 철도차량(1999), 고유모델 ATC/ATO/TWC System Description
3. 김중환, 강리택, (1998), "ATO 장치의 자동열차속도 조절 알고리즘에 관한 연구",