

열차제어시스템 개발에 있어서의 시스템 엔지니어링

이중우*^o, 정의진*, 황중규*
*한국철도기술연구원

System Engineering for Development of Train Control System

J.W.Lee*^o, E.J.Joung*, J.G.Hwang*
*KRRI(Korea Railroad Research Institute)

Abstract - A system engineering play a key role in new signalling system development. The signalling system development process consists several phases which are requirement analysis, functional analysis, system synthesis and system analysis. Each phase of the development are decomposed according to system engineering process. The key topics to be considered are shown in the each phase such as safety. This paper shows the application of system engineering process to a signalling system development.

1. 서 론

본 논문에서는 철도시스템의 열차제어시스템인 집중제어장치, 연동장치, 자동열차제어장치에 관련된 시스템 엔지니어링 기술을 개발하고 있다. 엔지니어링 기술의 개발은 개발에 관련된 기술을 체계화할 수 있음으로서, 신호시스템의 안전성·신뢰성확보에 쉽게 확보할 수 있으며, 신호시스템을 개발할 때에는 필요한 부분만을 선택적으로 개발할 수 있어 기술변전에 쉽게 적용할 수 있도록 한다. 열차의 주행속도의 증가에 따라 제동거리가 늘어나게 되며, 이에 따라 폐색 구간별 제한 속도의 변화도 필연적이다. 증가된 속도에 대한 열차간격과 진로에 대해서 안전성을 확보하기 위해서는 새로운 신호체계를 필요로 한다. 또한 전체적인 신호시스템을 교환할 수 없으므로, 새로운 코드와 이미 사용하고있는 속도코드 사이에 호환성확보 하여야 한다. 속도향상에 따른 안전성의 확보와 기존 신호시스템과의 호환성확보에 관한 연구가 필요하다.

2. 신호시스템 엔지니어링

2.1. 신호제어시스템

2.1.1 고속운전에서 속도와 진로제어

신호 시스템은 속도에 따라서 열차의 간격을 조정하는 것이 제1의 목적이다. 열차의 속도의 조절은 제동장치의 성능과 직접적인 관계가 있다. 선행열차와 후속열차간의 간격, 선형에 따른 열차의 속도제한 및 그 밖의 다른 제한 조건에 의해서 주행속도를 결정하여 열차의 안전을 확보한다.

신호시스템은 열차의 속도를 제어하기 위한 장치이다. 열차속도 제어는 여러 가지 장치를 이용하여 가능하다. 신호장치는 열차속도를 결정하기 위해서 관련된 정보를 수집하여 안전을 고려한 열차의 주행속도를 결정하게 된다. 결정된 주행속도는 신호변에 설치된 컬러 신호등을 이용하여 기관사에 현시 하거나, 차상에 속도를 현시한다. 기관사는 이 신호를 보고 열차의 속도를 조절한다.

열차의 진로제어는 궤도를 움직여 열차의 진로와 그에 따른 속도를 결정하는 것이다. 진로의 선택은 열차의 속도를 결정하며, 진로설정 시에는 다른 진로가 동일 구간을 사용하고 있는지 혹은 열차가 진입하고 있는지 등의 다양한 조건을 고려하여 진로를 개통한다. 진로개통에 오류가 발생할 경우에는 열차의 충·추돌, 측면충돌 및 탈선을 야기 시킬 수 있다.

열차진로를 설정 시에, 운용자 혹은 시스템 자체 의

오 조(동)작으로 인하여 언급한 위험을 방지하기 위해서, 구조적으로 오 동작 방지를 하여야 한다.

2.1.2 안전성과 신뢰성

열차의 속도는 신호기기에 의존하여 결정되기 때문에, 신호기기의 고장 혹은 오작동은 바로 열차의 사고로 이어질 수 있다. 신호기기는 자연적인 상태 즉 사계절, 밤낮으로 운영을 하기 때문에, 상당히 가혹한 조건에서 작동되고있다. 또한 신호기기는 넓은 지역에 퍼져있고, 선로변에 설치되어 있기 때문에 보통의 산업용 기기보다는 유지보수와 사용환경이 대단히 열악하다. 대부분의 구성장치는 여러 개의 구성되어 있고, 여러 기업에서 만들고 있기 때문에 획일화된 품질과 인터페이스가 확보하기는 쉽지 않다. 또한 유지보수 시에 선로변 작업하는 보수원의 안전에도 상당한 위험이 있다.

신호시스템의 안전성의 확보는 3가지로 귀결된다.

- 열차제어속도의 명백한 제어논리
- 사용되는 장치의 고 신뢰성
- 장치 고장 시의 안전장치의 안전 측 작동의 3가지로 귀결될 수 있다.

열차속도제어 시스템의 잦은 고장은 열차의 운행신뢰성을 저하시키므로, 현대사회에서 수송기관으로서 경쟁성을 저하시킬 수 있다. 열차속도제어 시스템을 구성하고 있는 장치들은 사용환경을 설정하여 그에 알맞은 신뢰성을 확보하여야 한다. 만약에 장치들이 설정된 환경을 만족하지 못한다면, 장치들에 맞게 사용환경을 만들어서 운용하여야 한다.

2.1.3 전자파 영향

전철의 고속화와 대량수송은 대규모 전류를 사용, 가선과 팬터그래프간의 이선의 중대 등은 많은 전자파를 발생한다. 기기가 오동작을 하지 않도록 이 전자파의 특성을 규명하여 억제할 수 있는 부분은 억제하고, 기기의 내성을 갖추어 유해전자파에 견딜 수 있어야 한다.

신호 시스템이 전자파에 의해서 영향을 받을 수 있는 원인은 전도성, 정전·전자 유도에 의해서 피해를 받을 수 있다. 외란의 원천은 급전선, 전차선로 및 송전선로에 의해서 발생될 수 있다. 피해의 결과로서는 도체로 유도되는 기전력, 통신회로의 잡음, 장치의 오동작 등이 발생할 수 있다.

2.1.4 전자파가 미치는 영향

신호 시스템은 마이크로 일렉트로닉화, 컴퓨터 및 소프트웨어를 이용하고 있다. 과거의 기계식, 전자식을 이용할 때보다 상당한 운용효율을 향상시킬 수 있으나, 반대로 안전성과 신뢰성을 확보해야할 필요가 있다. 따라서 새로운 제품에 대한 안전성과 신뢰성을 평가할 수 있는 시스템을 필요로 한다.

2.1.5 신호시스템 기본(안)

신호제어 시스템의 개발은 경부고속철도의 시스템을 최대한 활용하여 350 km/h 신호시스템을 개발하는 것이다. 경부고속철도의 신호시스템의 기본개념은 다음과 같다.

- 궤도회로를 이용하여 단방향 정보전송을 이용한 차상신호시스템
- 단계속도제어를 이용한 안전거리 확보

- 마이크로 프로세서를 이용한 제어장치
- 차상기기의 작동 및 해제는 불연속정보를 이용한 시스템
- 전자연동장치의 이용
- 궤도변 모드를 이용한 선로변 신호기기의 제어

2.2 신호시스템의 엔지니어링절차

2.2.1 시스템엔지니어링 절차

시스템 엔지니어링 절차는 다음의 그림과 같이 정의할 수 있다. 시스템 엔지니어링은 요구사항, 요구사항분석, 기능분석, 시스템 합성 및 시스템 분석의 단계를 거친다. 그림 1에서 시스템엔지니어링 절차를 나타내었다. 시스템엔지니어링을 단계와 제품의 라이프사이클에 따른 분류를 하면은 다음과 같은 도표로 나누어진다. 라이프사이클은 사전 개념단계, 개념탐구, 사업의 정의 및 위험요소 저감, 설계 및 제작단계, 생산, 설치, 유지보수, 폐기 단계로 나누었다.

2.2.2. 기능분석

신호시스템의 기능분석을 통하여 각 시스템의 기능을 도출하였다. 다음에 오는 기능은 자동열차제어장치에 관한 것으로 열차 안전운전을 하기 위한 기능을 도출하여 열거하였다.

표 1. 자동열차제어장치의 기능

| 기능 | 설명 |
|--------|---|
| 열차검지 | 궤도회로를 이용하여 점유된 열차검지 |
| 일기검지 | 풍속이 35m/s일 경우 열차정지 강설이 기준이상 경우 열차서행 강우가 60mm/h, 250mm/day 및 홍수일 경우 열차 속도 80~90km/h |
| 침입검지 | 침입이 검지된 경우 170km/h로 속도제한 |
| 열차상태검지 | 차축의 온도가 90℃ 일 경우 열차정지 |
| 허용속도계산 | 폐색구간에서의 최대속도 계산 |
| 열차주행감시 | 허용된 속도와 열차속도를 비교하여 열차의 속도제어 |
| 보호 | 인명과 기기를 위하여 0km/h와 90km/h로 속도 한 |
| 유지보수 | 유지보수를 위한 데이터의 저장 |
| 통신 | 다른시스템에 관련정보의 제공 |

각 기능에 대해서는 기능명, 기능요구사항, 입출력 및 관련 기능을 기술하였다. 각 기능의 요구사항분석은 요구사항을 근거로 하여 자동열차제어장치 중의 한 기능을 나타낸다.

완전감시기능

- 기능정의 : 열차의 모든 제한속도와 정지신호를 감지하는데 사용한다.
- 요구사항 : 완전감시 상태로 전환은 데이터 입력 혹은 부분 감시상태로부터 수행되고, 감시는 자동적으로 발생한다. 완전감시는 MMI장치에 표시되어야 한다. 완전감시상태로의 천이는 기록되어야한다. 완전감시는 열차속도, 노선속도, 이동허가 및 열차제동감시의 보호기능이 제공되어야 한다.
- 입력 : 열차데이터, KTCS 이동허가
- 출력 : MMI, 기록시스템
- 설명 : 완전감시상태는 열차데이터와 이동허가정보를 수신한 열차정보를 필요로 한다.
- 비교 : 선로변 신호 장치를 없애는 영향에 대해서 보다 많은 고려를 필요로 하다.

2.2.3 시스템 합성

자동열차제어 장치의 H/W 시스템은 중앙처리장치, 입출력 장치 및 인터페이스 프레임, 궤도회로, 푸트회로, 궤도회로 릴레이, 방향릴레이, 통신장치, 침입검지장치, 끌림검지 및 차축열 검지장치로 구성되어 있다. 중앙처리장치는 인터페이스 프레임을 통하여 각종장치들과 연결되어 있다. 각각의 장치는 표 1에서 정의된 기능

의 구현에 하다. 그림 1은 자동열차제어 장치의 구조를 나타내고 있다. 중앙처리장치에는 CPU보드, 안전성이 확보된 입출력장치 및 인터페이스 카드, 통신장치는 중앙장치에 포함된다. 나머지 장치는 현장 또 기기실에 중앙장치와 분리되어 설치되어 있다.

자동열차제어장치의 S/W의 구성은 논리계산, 입력, 출력, 진단의 모듈로 나누어진다. S/W의 구성도는 그림 2와 같다. 진단 모듈은 CPU보드의 진단과 프로세스 처리시간을 검사한다. 입력모듈은 센터로부터의 입력정보, 인근 폐색정보 등이 입력된다. 입력된 정보는 계산을 위하여 논리계산장치와 출력장치로 전송된다. 논리연산장치는 연산을 수행하여 출력장치와 다시 입력장치로 전송이 된다.

자동열차 제어장치에 소요되는 모듈을 기능별로 독립성과 호환성을 쉽도록 하는 것을 기준으로 하였으며, 일단은 직접제작보다는 시장에서 쉽게 구입할 수 있는 부품용 기준으로 하여 분류하였다.

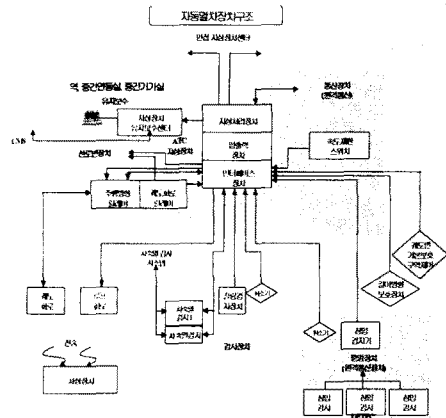


그림 1. 자동열차제어장치 H/W구조

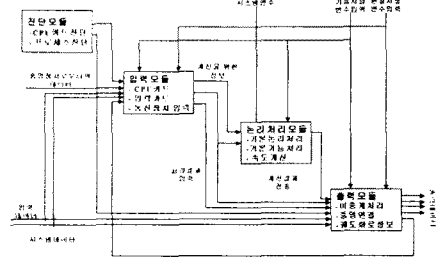


그림 2. 자동열차제어장치 S/W구조

2.3 안전성 분석

2.3.1 안전성 분석의 기본절차 도출

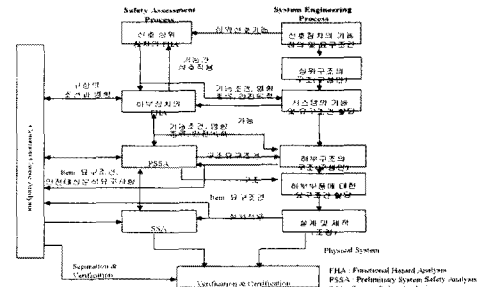


그림 3. 안전성 분석절차

신호시스템의 안전성 분석은 신호시스템의 기능적인 위험요소분석, 하부장치의 기능요소분석, 그것을 이용하여 일차 시스템 안전성 분석과 시스템 안전성 분석을 수행하였다. 안전성 분석절차는 그림 3과 같다.

2.3.2 위험요소분석, 안전도 요구사항

자동열차제어장치에서 존재하고 있는 위험요소를 다음과 같이 간략화하여 분류할 수 있다.

- 지상측
 - 제어정보 통지실패 - 신호장치의 고장
 - 선로변 작업자에 위험
 - 차상측
 - 신호장치의 고장 - 신호장치의 고장
 - 차량제어 실패 - 자동열차제어장치의 고장
- 신호장치가 고장이 났을 경우 발생하는 사고의 심각성과 고장이 발생할 수 있는 빈도를 가정하여 위험도를 도출하였다. 이 위험도에 따라 각 장치의 안전성 무결성을 결정하여, 각 장치에 해당하는 안전도 등급을 설정하여, 그 등급에 따라 안전성 요구사항을 설정하였다. 자동열차제어 장치에 할당된 안전성 요구사항은 다음과 같다.

표 2. 자동열차제어장치의 기능별 안전성 레벨 할당

| sys. | 기능 | H/W | S/W | 안전 요구사항 | 가용성 |
|-------|-------------|-------------|-----------|-------------|--------|
| ATC | 속도생성 | 선로변 프로세서 | 속도계산 | $10^{-9}/h$ | 99.98% |
| | 열차검지 | 레도회로 | | $10^{-9}/h$ | |
| | | 배색 | 관리 | | |
| | 열차검지 및 속도계산 | I/O 기능모듈 | 통신 및 장치관리 | $10^{-9}/h$ | |
| | 열차검지 | Vital Relay | | $10^{-9}/h$ | |
| | 침입감시 | 침입감시기 | | | |
| | 일기감시 | 일기검지기 | 허용속도 계산 | | |
| | 열차속도감시 | 차상장치 | 속도감시 | $10^{-9}/h$ | |
| | | 현시장치 | 속도현시 | $10^{-9}/h$ | |
| 인터페이스 | Antenna | | | | |

안전성 요구사항을 만족하기 위해서는 바이탈 릴레이를 사용 하든가 혹은 2중계로 설계를 하여 고장 시에도 장치가 반드시 안전 측으로 작동되는 것을 입증하여야지만 신호시스템을 사용할 수가 있다.

2.4 환경요구사항 및 시험평가

2.4.1 환경요구사항

환경요구사항은 각 파라미터에 따라 분류를 하였으며 대표적으로는 8가지로 구분할 수 있다. 각 구분은 아래 표와 같이 분류를 하였다. 환경 요구사항은 각 장치가 설치되어 운용되는 것에 따라서 설정되어 졌다. 차상장치 같은 경우는 가혹한 진동, 온도조건 및 전자파가 발생하는 곳에서 작동을 하게 된다. 표 4에서는 자동열차장치가 사용되는 장소에 따라서 환경조건을 분류하였다. 시험평가는 환경조건에 따라서 다음과 같이 설정하였다. 다음과 같은 조건을 설정하여 수명시험을 하도록 하였다. 자동열차제어장치에서 가장 가혹한 수명시험은 안전성 요구사항에 따라 각 장치는 요구조건을 만족하여야 한다.

표 3. 항목별 환경설정

| 항 목 | 세 부 항 목 |
|-------|--|
| 기 후 | 주위온도, 태양방사, 응축, 상대습도, 대기압, 바람, 고도, 강우량 |
| 기 계 | 진동, 충격 |
| 전 기 | 전자기환경 (EMI/EMC), 전자파 감응성 및 발생, 과도상태 (스파크, 서지), 전원, 접지 및 본딩 |
| 생 물 | 동물, 식물, 조류 |
| 기 타 | 온도, 기압변화, 공기흐름, 먼지, 강우량 |
| 인간 공학 | 운전자의 건강보호, 운전자의 편안감, 최대의 업무효율성 확보 |
| 화 학 | 오염, 화학물질, 부식, 용매에 대한 내성 |
| 일 반 | 안전성, 신뢰성, 유지보수성, 부품, 폐기물, 지진, 화재 및 화재발생 위험지역 |

표 4 자동열차제어장치의 시험항목

| 장 치 명 | 운용 환경 | 환경요소 | 관련 시험 규격 |
|-----------------------------|-------|-------------------|---|
| On-Board Computer Equipment | 기관차 | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ | ① IEC 68.21 IEC 68.22 IEC 68.214 IEC 68.241 IEC 68.261 IEC 68.25 |
| | | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ | ② IEC 68.23 IEC 68.230 IEC 68.238 IEC 68.256 IEC 68.261 IEC 68.218 |
| | | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ | ③ IEC 68.242 IEC 68.243 IEC 68.245 IEC 68.268 ISO 9225 IEC 68.227 IEC 68.229 IEC 68.231 IEC 68.232 IEC 68.234 IEC 68.235 IEC 68.236 IEC 68.237 IEC 68.250 IEC 68.251 IEC 68.253 IEC 68.255 IEC 68.257 IEC 68.259 IEC 68.262 IEC 68.26 IEC 68.27 |
| Display Unit | 기관차 | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ | ④ IEC 571.1 IEC 571.2 IEC 571.3 IEC 801.1 IEC 801.2 IEC 801.3 IEC 801.4 |
| | | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ | |
| Antenna | 기관차 | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ | |
| | | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ | |
| | | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ | |
| | | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ | |
| Connection box | | ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ | |

- ① 주위온도 ② 태양방사 ③ 습도
 ④ 기압 및 고도 ⑤ 침수 및 강우 ⑥ 오염물질
 ⑦ 기계적 요인 ⑧ 인간공학적 요인 ⑨ 전기적 요인

4. 결론

신호시스템은 시스템은 최고수준의 안전성을 요구하고 있다. 안전성을 확보하기 위해서는 시스템엔지니어링의 각 단계마다 철저한 문서화가 요구되고 있으며, 이 문서들을 평가할 수 있는 체계가 갖추어져야 한다. 현재 신호시스템 엔지니어링에서 추진하고 있는 단계는 각 시스템엔지니어링에서의 문서화와 안전성 평가체계를 구축하고 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Railway Control System, Institute of Railway Signal Engineers, 1991
- [2] Railway Signalling, Institute of Railway Signal Engineers, 1991
- [3] Technical Requirement, NYCT, 1997
- [4] ETCS Environmental Specification Part 1, 2. UIC, 1996