

철도신호시스템 운용규정에 Formal Method의 적용

Formal Method for Operational Regulations to Railway Signalling System

김혜웅¹⁾
KIM Heeung*

이종우²⁾
LEE Jongwoo**

ABSTRACT

In railway signalling system, there are several kinds of signal system such as signals, signs, marker. The signals allows train to go or not, the signs permit to communicate between railway men, and the marks indicate status of railway lines. In KNR, the application of the signal systems are defined in railway operational regulations, operational related regulation, Operation safety critical system manipulation manual, and so on.

In this paper, we extracted regulations for signalling system operation from related regulations, reviewed compatibility and contradiction for signalling system operations. We tried to check logical integrity of informal signalling operation regulation using formal method.

1. 서론

철도신호시스템은 철도운행과 안전에 있어서 중요한 부분으로 시스템으로 신호시스템에 오류가 발생하면 귀중한 인명과 물질적 피해를 초래할 수 있다. 철도운행과 안전을 확보하기 위하여 철도법에 근거하여 철도운전취급규칙, 안전수칙 등이 마련되어 있다. 이러한 규칙, 규정에는 안전, 정확, 신속 등이 고려되어야 하는데 여기에서 안전이 가장 중요한 것이다.

운전규칙이나 안전수칙 등은 철도운행안전에 있어서 중요한 역할을 하였다. 그러나 운전규칙과 같이 자연언어로 되어있는 요구사항 명세서는 많은 모호성을 갖고 있으므로 신호취급자나 기관사에게 혼란을 야기할 수 있으며 여러 철도관련규정에서 신호적용이 일치성을 갖고 있는지 검증은 수행하기도 어려운 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 철도관련규정에서의 요구사항에 대하여 형식기법을 적용하여 명세의 모호성을 제거하고 검증은 수행하기 용이하게 함으로서 높은 안전도와 신뢰도를 요구하는 철도신호시스템 분야의 안전규칙을 개발하는데 유용하다.

-
- 1) 김혜웅, 서울산업대학교 철도전문대학원 전기신호공학과
E-mail : jeanhelen@hanmail.net
TEL : (011) 9768-3198 FAX :
- 2) 이종우, 서울산업대학교 철도전문대학원 전기신호공학과
E-mail : saganlee@snut.ac.kr
TEL : (02) 970-6874 FAX : (02) 978-6874

2. 철도신호시스템

철도신호시스템은 열차의 운전조건을 제시하는 설비로서 열차 진행의 가부를 표시하는 신호, 철도원간 상호의사를 전달하는 전호 및 장소의 상태를 표시하는 표지등이 있고, 표시수단으로 형, 색 음이 있다.

2.1 철도신호의 분류

① 신호기

신호기는 열차진행의 가부를 나타내는 것으로 신호기의 종류는 상치신호기, 임시신호기, 수신호, 특수신호 및 차상 신호기가 있다.

상치신호기는 열차가 통상적으로 운행하기 위해 고정된 장소에 항상 설치되어 있는 신호기로서 정거장 구내로 진입 가부를 알려주는 장내신호기, 정거장에서 출발하여 다음 정거장까지 구간에 진입 여부를 알려주는 출발신호기 및 폐색구간에 진입 여부를 알려주는 폐색신호기가 있다. 이밖에 장내신호기가 정지신호라도 열차를 역으로 진입시킬 수 있게 하는 유도신호기와 입환차량의 진행가부를 결정하여 주는 입환신호기가 있다.

장내, 출발, 폐색신호기는 2~5현시의 특성을 갖고 있으며 이들의 신호는 통과, 감속, 주의, 경계, 정지 등으로 구성되어 있다. 이들 신호들은 이론적으로 정지신호를 제외하고는 열차가 이동할 수 있다. 유도신호기는 유, 무로 현시하며 장내신호기가 정지라도 유도신호기가 점등되어 있으면 일단 열차는 진입할 수 있다. 입환신호기는 진행과 정지 2현시로 차량의 진행가부를 알려준다.

임시신호기는 선로의 상태가 일시 열차의 정상운전을 허용하지 못할 경우 그 구역의 외방에 임시로 설치하는 신호기로서 서행, 서행예고, 서행해제 신호기가 있는데 열차는 그 구역에서 서행신호기에 의해 표시된 속도이하로 운전하게 된다.

수신호는 신호기가 설치되지 않았거나 또는 이를 사용하지 못하는 경우에 사용하는 것으로 열차는 정지수신호에 의하여 정차하며 그 외의 수신호에는 이동할 수 있다.

특수신호는 낙석, 낙뢰, 강풍 또는 긴급하게 열차를 방호하기 위하여 경계를 필요로 할 때 빛 또는 음향에 의해서 신호를 하는 것으로 발보신호·발광신호·폭음신호·화염신호 등이 있다. 특수신호는 열차를 정차하도록 하는 신호이다.

② 전호

전호는 종사원 상호간의 의사 전달을 하기 위한 것으로 전호에는 역장과 차장이 지정된 방식에 따라 열차를 출발시킬 때 행하는 출발전호, 선호전환기의 개통상태를 관계자에게 알릴 경우에 사용하는 전철전호 및 정거장에서 차량을 입환할 때 수전호 또는 전호등에 의하여 행하는 입환전호 등이 있다. 열차는 전호에 의하여 움직인다.

전호는 신호기가 없거나, 신호기가 고장이거나 할 경우에 주로 사용한다.

③ 표지

표지는 장소의 상태, 물체의 위치, 방향, 또는 조건을 표시하는 것으로 중요한 표지는 자동폐색 식별표지, 서행허용표지, 출발신호기 반응표지, 입환표지, 열차정지표지, 가선중단표지, 출발선 식별표지, 차량정지표지 및 차량접촉 한계표지, 궤도회로 경계표지가 있다.

자동폐색 식별표지와 서행허용식별표지는 자동폐색 구간의 폐색신호기 아래쪽에 설치하여 폐색신호기가 정지신호를 현시하더라도 일단 정지하지 않고 서행 운전한다.

입환표지는 차량의 입환작업을 하는 선로의 개통상태를 나타내는 표지로서 입환신호기와 다른 점은 무유도 표시등이 없는 형태로 차량의 입환을 할 때 수송원의 유도를 필요로 한다.

2.2 신호, 전호 및 표지간의 상호관계

① 신호간의 관계

열차의 운전은 신호기에 의존을 한다. 신호기는 정해진 규칙에 의해서 열차를 운용하게 되어 있다. 그러나 신호기의 고장 또는 기타사유로 인하여 사용할 수 없을 때는 상치신호기 대용으로 수신호나 전호를 사용하여야 하며 선로의 사정으로 일정한 기간 동안 정상적운행이 어려운 곳에는 임시신호기를 설치하여 서행하게 하여야 한다. 이밖에 선로 고장이나 장애물 등을 발견 시에는 방호를 위하여 특수신호로 열차를 급히 정차시켜야 한다.

② 신호와 전호

신호는 모양, 색 또는 소리로 열차나 차량에 대한 운행의 가부와 운행의 조건을 지시하며 전호도 모양, 색 또는 소리로 종사원간의 상호 의사를 전달하는 것이라 성질을 따서는 명백한 구분이 없으며 다만, 신호는 현시하는 것이 결정된 조건(정지, 진행 또는 주의 등)을 정적인 상태로 지시하는 반면 전호는 연속적인 동적인 개념이 강하게 나타나고 있다. 예를 들면 신호기는 열차의 진행이나 정지 조건만 제시할 수 있거나 전호는 전진, 후진, 서서히 등 여러 가지 신호를 현시할 수 있다. 그러므로 전호는 신호를 세분한 것이라 볼 수 있다.

③ 신호와 표지

표지는 모양 또는 색등으로 물체의 위치, 방향, 조건 등을 표시하는 것으로 큰 의미에서 신호와 명백한 구분이 없다. 다만, 일정의 물체를 게시하거나 붙여 둔다는 것과 같이 정적인 상태란 점이 신호와 차이점뿐이다. 표지는 결정된 사항이 일정기간 변함없이 그대로 표시하고 신호는 그때그때 사정에 따라 조건(정지가 진행으로 등)이 시시각각 변한다는 것이다. 예를 들면 장내신호기는 상황에 따라 녹색, 황색, 적색등으로 시시각각 변하지만, 서행허용표지는 서행구간이 정상적으로 운전할 수 있을 때까지 현시하여 둔다.

④ 표지와 전호

표지와 전호는 큰 의미상 신호의 일종으로서 표현방식이 다를 뿐 명백한 구분이 없다. 다만, 전호는 연속적인 동적(신호기 좌우, 상하로 흔들다 등)인 개념이 강하며 표지는 한번 결정되어 현시하면 일정기간 변화 없이 그대로 표시한다는 것이다. 간단히 예를 들면 전호로는 추진운전, 출발, 후퇴등 관계직원에 의해 여러 전호를 현시할 수 있거나 표지는 입환표지, 열차정지표지등 장소의 상태를 나타내는 것으로 일정한 곳에 장기간 설치하여 둔다.

3. 열차운행의 형식화

3.1 열차운전의 형식화

열차는 다음의 axiom에 의해서 진행 및 정지를 한다. 열차의 출발 및 진행은 신호기의 현시와 사령의 지시에 의해서 이루어진다. 열차 진행에 관련된 axiom 3개이다. 열차의 정지와 관련된 axiom은 신호기 적색, 운전사령 지시 및 특수상황신호가 있다. 열차의 진행과

정지를 는 정의된 axiom

① premise의 정의

열차가 운행을 하기 위해서 정의되는 전제는 앞 절에서 설명한 것과 같이 운전규정을 준용하였다. 신호와 전호는 열차의 진행과 정지를 결정하는 점에서 동일하다. 전호를 적용하면 신호기는 사용하지 않는다. 따라서 열차 진행가부를 결정하는 전제를 정의하기위해서 전호는 생략할 수 있다.

명칭	기호	명칭	기호
열차	tr	정거장	st
신호기	si	운전사령	dp
표지	pc	서행표지	pcY
자동폐색정지신호	AsiR		

(1) 상태 조건

p1 : 진행
p2 : 서행
p3 : 정지

(2) 열차에 대한 전제

tp1: 열차가 진행한다.
tp2: 열차가 서행한다.
tp3: 열차가 정지한다.
tp4: 1분 정차한다.

(3) 신호기의 현시

siR : 신호기가 적색이다.
siYY : 신호기가 경계이다.
siY : 신호기가 주의이다.
siYG : 신호기가 감속이다.
siG : 신호기가 통과이다.

(4) 운전사령의 premise

dpR : 운전사령은 열차를 정지시킨다.
dpYY : 운전사령은 열차를 서행시킨다.
dpY : 운전 주의이다.
dpYG : 신호기가 감속이다.
dpG : 신호기가 통과이다.

(5) 수신호

haR : 정지 수신호가 있다.
haG : 통과 수신호가 있다.
spR : 특수신호가 작동하였다.

(6) 선로상태

ob : 선로에 장애물이 있다.

br : 선로가 고장 났다.

co : 선로에서 공사를 한다.

wi : 천재지변, 악천후가 발생하였다.

② 기호의 정의

→ : 생성규칙을 나타내는 기호, 예를 들면 $a \rightarrow b$, a가 있으므로 b가 있다.

\wedge : 모두가 참이면 참이다.

\vee : 적어도 하나가 참이면 참이다.

\vdash : 결론을 의미한다.

\neg : 부정을 나타낸다.

$$\psi ::= \wedge \mid \vee \mid \neg \mid \rightarrow \mid \vdash$$

3.2 열차의 진행 적용

5현시 폐색신호기를 대상으로 하여 formal method로 분석을 하였다. 정상적인 열차운전에서 열차는 폐색신호기에서 다음폐색신호기 까지 진행을 한다. 폐색신호기는 정지, 경계, 주의, 감속 및 통과가 있다. 이 내용을 축약하면 열차의 정지와 진행에 관련된 것이다. 열차가 폐색신호기(i)에서 폐색신호기(i+1)로 가기 위해서, 열차는 폐색신호기(i)의 신호를 준수해야 된다. 다음은 폐색신호기(i)의 신호에 대해서 형식기법으로 나타내었으며, 열차가 폐색신호기(i+1)에 도착하기 전까지를 기준으로 하여 분석을 하였다.

폐색신호기의 정지신호를 제외하고는 경계, 주의, 감속 및 통과는 진행신호로 간주하였다.

① 신호기가 진행신호

- 신호기가 진행이면 열차는 진행한다.

$$(siYY \vee siY \vee siYG) \rightarrow (tp2)$$

$$siG \rightarrow tp2$$

② 신호기가 적색

(가) 신호기가 적색이었다가 경계로 바뀌는 경우

(1) 신호기가 적색이면 열차는 정지한다.

(2) 폐색신호가 통과로 현시되면 진행한다.

(3) 열차가 다음 폐색에 도착한다.

$$siR \rightarrow tp3$$

$$siG \rightarrow tp1$$

$$(siR \rightarrow tp3) \wedge (siYY \rightarrow tp1) \vdash tp1$$

(나) 폐색신호가 적색인 경우

(1) 열차는 폐색신호가 적색이면 정지한다.

- (2) 사령의 지시에 의해서 열차를 진행한다.
- (3) 열차가 다음 폐색에 도착한다.

$siR \rightarrow tp3$
 $dpYY \rightarrow tp2$
 $((siR \rightarrow tp3) \wedge (dpG \rightarrow tp1)) \rightarrow tp1$

(다) 폐색신호가 적색이고 일정시분이 지난 경우

- (1) 열차는 폐색신호가 적색이면 정지한다.
- (2) 자동폐색이면 1분 정차한다.
- (3) 서행으로 진행한다.
- (4) 열차가 다음 폐색에 도착한다.

$siR \rightarrow tp3$
 $AsiR \rightarrow tp4$
 $(siR \rightarrow tp3) \wedge (AsiR \rightarrow tp4) \vdash tp1$

(라) 폐색신호가 구배표시가 있는 경우

- (1) 열차는 폐색신호가 적색이면 정지한다.
- (2) 표지가 9/1000가 있으면 서행한다.
- (3) 열차가 다음 폐색에 도착한다.

$siR \rightarrow tp3$
 $pcY \rightarrow tp2$
 $(siR \rightarrow tp3) \wedge (pcY \rightarrow tp2) \rightarrow tp1$

(마) 폐색신호기를 통과한 후

- (1) 특수신호가 발현하면 열차는 정지한다.
- (2) 사령지시로 진행한다.
- (3) 열차가 다음 폐색에 도착한다.

- 특수신호가 발현하면 열차는 정지한다.

$spR \rightarrow tp3$

- 정지 수신호가 있으면 열차는 정지한다.

$haR \rightarrow tp3$

- 통과 수신호가 있으면 진행한다.

$haG \rightarrow tp1$

- 특수신호가 있으면 열차는 정지한다.

$spR \rightarrow tp3$

- 선로에 장애물이 있으면 열차는 정지한다.
ob → tp3
- br : 선로고장이면 열차는 정지한다.
br → tp3
- co : 선로공사이면 열차는 정지한다.
co → tp3
- wi : 천재지변, 악천후이면 열차는 정지한다.
wi → tp3

③ 추론

위 폐색이동에 관련된 규칙을 정리를 하면 다음과 같다.

$$siG \rightarrow tp1 \quad haG \rightarrow tp1$$

$$(siR \rightarrow tp3) \wedge ((siG \rightarrow tp1) \vee (dpG \rightarrow tp1) \vee (AsiR \rightarrow tp4) \vee (AsiR \rightarrow tp2)) \vdash tp2$$

$$(haR \vee spR \vee ob \vee br \vee co \vee wi) \rightarrow tp3$$

위 식을 이용해서 상태천이도 그리면 그림 1과 같다.

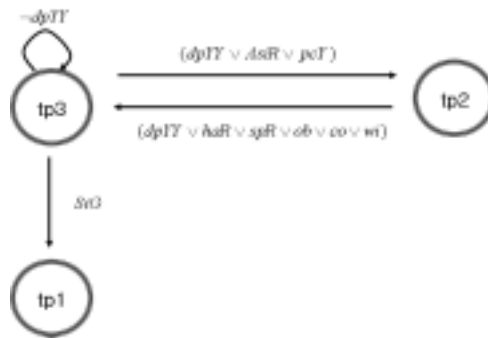


그림 1 폐색신호 통과 상태천이도

4. 결론

열차운전규정에서 제시된 규정을 가지고 폐색신호기를 통과하는 절차에 대해서 formal method를 적용하였다. 모든 규정을 적용하였다 할지라도 사령지시에 의해서 열차는 운행될 수 있다. 안전성을 확보하기 위해서 사령의 지시는 서행기준 이상으로 열차가 주행을 하면은 사고가 발생할 수 있다.

[참고문헌]

- [1] 철도청 운전관계규정(실무용)
- [2] 김영태 신호제어시스템 테크미디어
- [3] 박진홍 형식언어와 유한상태머신 교우사
- [4] Michael HUTH Logic in Computer Science Cambridge University Press
- [5] 장직현 et al. 형식현와 오토마타 사이텍 미디어
- [6] C. Michael Holloway Fourth NASA Langley Formal Methods Workshop