

FTA(Fault Tree Analysis)를 이용한 철도신호설비 안전기준대상 선정에 관한 연구

A study on Setting up Safety Criteria of Railway Signalling System Using FTA(Fault Tree Analysis)

윤용기*
Yoon, Yong-Ki

정락교**
Jeong, Rag-Gyo,

김용규**
Kim, Yong-Kyu

ABSTRACT

Railway signal system is responsible for the safety operation of railway and performs vital functions as safe space control, route control and etc. These functions prevent collision accidents between trains and derailment accidents of trains. However, these accidents are occurred by some causes. It is necessary to analysis hazards, hazard frequency and risk contribution. And railway signal system must make practical application of the analysis results.

This paper includes analysis results of railway accident data by FTA(Fault Tree Analysis) and hazards. Railway signal system must consider these hazards. This paper used the railway accident data of RSSB(Railway Safety & Standard Board) of UK. We will use the FTA result to set up a draft of safety criteria of railway signal system.

1. 서 론

철도신호설비의 임무는 열차운전을 보호하고 안전하게 하는 것이며, 근래에는 열차운영효율 향상을 포함한다. 이러한 임무를 수행하기 위하여 신호설비는 역구내에서 열차운전 및 입환을 안전하고 능률적으로 수행하는 열차진로제어설비, 선형열차와의 안전간격을 확보하는 열차간격제어설비 및 각종 운전보안/정보화설비로 구성된다^[1].

국내 철도건설·운영기관은 철도신호설비의 설치·운영과 함께 노후설비(또는 차량)의 개량·교체 및 건널목 입체화 등을 통해서 철도사고가 발생하는 것을 방지하고 있다. 특히, 고속철도 건설과 함께 차축온도검지장치, 지장물 검지장치, 끌림검지장치, 지진감시시스템, 기상설비, 용설장치, 열차접근확인장치, 본선터널검지장치 및 레일온도검지장치 등의 운전보안설비를 도입하여 발생한 가능한 고속철도 사고를 방지하고 있다.

위와 같은 활동을 통해서 국내 철도사고는 지속적으로 감소하고 있지만, 간헐적으로 발생하는 화재, 충돌 및 탈선과 같은 중대한 철도사고는 철도안전체계와 철도신호설비의 안전수준에 대한 지속적인 관리가 필요함을 보여주고 있다. 영국의 경우, 철도신호설비의 개념설계부터 폐기까지 전 수명주기 동안 위험원을 도출하고 위험도를 평가하여 허용수준 이하로 관리하는데 필요한 안전성활동의 문서화 및 승인절차와 관련한 지침(Yellow Book)^[2]을 권고하고 있으며, 안전성을 판단하는 핵심원칙으로서 ALARP(As Low As Reasonably Practicable)을 적용하고 있다^[2]. 프랑스와 독일도 위험도 평가를 기반으로 한 적절한 안전관리체계를 적용하고 있다.

본 논문에서는 철도사고에 대한 FTA를 적용하여 철도안전관리체계에 포함될 철도신호설비안전기준(안)에서 대상으로 할 철도사고의 종류 및 위험원을 도출하고자 한다.

2. 철도사고 분석

본 논문에서는 철도운행과정에서 발생된 인명사상과 시설물 파손을 철도사고로 정의한다. 철도시스

템을 구성하는 차량, 궤도, 구조물 및 신호설비의 발달 및 관련 유지관리기술의 발달로 철도사고의 발생은 감소하고 있으나, 철도운영장애 시 소요되는 비용은 철도운영기관에 경제적인 부담이 되고 있다. 이에 최근에는 철도사고에 경제적인 손실을 포함하는 경향이 있다.

본 논문에서 대상으로 하는 철도사고는 인명사상과 시설물 파손으로 제한했으며, 분석은 영국자료^[3]를 활용하였다. 철도신호설비의 안전기준대상을 선정하기 위해서는 국내의 자료를 사용해야 하지만 국내에 축적된 자료의 충실도가 낮고, 해외의 철도신호시스템을 국내에 도입하여 운영하고 있는 상황이고, 철도신호설비에 적용되는 기술내용에 큰 차이가 없기 때문에 해외자료를 사용하여도 커다란 문제는 없는 것으로 판단하였다.

2.1 철도사고의 분류

SRM(Safety Risk Model)에서 고려하고 있는 위험요소는 122개이고, 이러한 위험요소를 4개의 철도사고로 분류할 수 있다. 이 같은 철도사고의 종류와 위험도는 표1과 같다^[3]. 특히, 철도방호 및 경보설비(TPWS : Train Protection & Warning System)의 유무에 따른 결과도 포함하고 있다. TPWS를 설치하는 경우, 열차사고는 17.5에서 14.9로 감소한 것을 보여주고 있다. 본 표에는 표현되지 않았지만, SPADs(Signals Passed at Dange)의 경우에는 열차사고가 58% 감소하였다.

표1에 있는 선로를 통행하는 자(Trepass)를 철도사고분류에 포함하고 있는데, 이는 유럽의 역구조와 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 유럽의 역구조는 개방형구조로 되어 있어 역부근의 선로를 일반인이 접근하고, 가로질러 가는 것이 가능하지만, 국내의 역구조는 일반이 역부근의 선로에 접근하는 것을 차단하는 구조로 되어있다. 따라서 국내의 철도사고분류에 Trepass를 적용하는 것은 적절하지 않는 것으로 사료된다. 표1은 자살에 의한 인명사상은 포함하지 않는다.

표 1 철도사고별 위험도(자살은 제외함.)

사 고 분 류	Risk(eq. fats/yr.)	
	without TPWS	with TPWS
Train accidents	17.5	14.9
Movement accidents(excluding trespass)	63.1	63.1
Non-movement accidents(excluding trespass)	63.8	63.8
Trepass	62.0	62.0
Total	206.4	203.8

2.2 열차사고

표 1에서 열차방호 및 경보설비는 열차감소와 깊은 관련이 있음을 확인하였으며, 이를 통해서 철도신호설비의 안전기준은 열차사고의 발생을 방지하는 것을 목적으로 해야 함을 알 수 있다. 이에 열차사고를 상세히 구분하고, 각 사고의 위험도를 비교한 내용은 다음의 표와 같다.

표 2 열차사고 위험도

열 차 사 고		Risk(eq. fats/yr.)
열차충돌사고	건널목에서 도로교통차량과 열차충돌사고	3.929
	열차간 충돌사고	3.838
	열차와 선로지장물과의 충돌사고	0.8357
	여객열차와 화물열차간 충돌사고	0.6601
	열차와 차막이와의 충돌사고	0.4687
열차탈선사고	여객열차의 탈선사고	3.165
	화물열차의 탈선사고	1.584
비정상적인 가감속		2.403
화재사고	여객열차와 화물열차의 화재사고	0.4846
폭발사고	여객열차와 화물열차의 폭발사고	0.07563
구조물사고	역사구조물 파손	0.05440

표2에서 보여주고 있는 바와 같이 열차사고는 건널목에서 도로교통차량과의 충돌사고, 열차간 충돌사고, 열차탈선사고 등이 많은 부분을 차지하고 있다. 또한, 선로의 지장물과의 충돌사고와 차막이와의 충돌사고도 충분한 검

토가 요구되는 사항이다. 이외의 화재사고, 폭발사고 및 구조물사고는 매우 경미하게 발생되고 있으나, 발생 시 미치는 영향은 매우 크다.

열차-선로지장물 충돌사고 및 지장물 충돌사고에 의한 열차탈선사고의 경우 철도신호설비가 직접적으로 제어할 수 있는 위험원이 아니므로, 철도신호설비와 지장물(장애물) 검지장치간에 긴밀한 인터페이스 체계를 구축하여 위험원을 제어하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

2.2 인명사고

철도의 인명사고는 운전자, 현장 작업자, 승객 및 선로를 통과하는 사람을 대상으로 한다. 인명사고는 표1에서와 같이 열차가 이동할 때, 열차가 정차하고 있을 때 및 철도시설물 보행자가 통과할 때 발생된다. 인명사고발생은 열차사고에 비해서 대단히 많이 발생하고 있지만, 철도신호설비를 설치하여도 줄어들지 않는 특성을 갖고 있다. 철도신호설비는 열차사고의 발생 원인에 대한 깊이 있는 분석이 요구되며, 인명사고는 필요한 안전설비, 유지보수 및 교육에 대한 접근이 좋을 것으로 판단된다.

3. 열차충돌사고의 FTA

철도신호설비를 설치하면 열차충돌사고 및 탈선사고를 60%정도 감소시킨다. 본 논문에서는 열차충돌사고에 한정하여 FTA를 수행하였다.

1. 충돌사고 (OR)	1. 열차-열차 충돌사고(주행선로) (OR)	1. 정보오류에 의한 사고 (OR)	1. 잘못된 정보 2. 명확하지 않은 정보 3. 정보오독 4. 정보전송 오류 5. 정보확인 실패 6. 정보에 대한 대처 실패 7. 정보 무시
		2. 운전자오류에 의한 사고 (OR)	1. 신호기 확인 실패 2. 신호기정보에 대한 조치 실패 3. 운영규정에 대한 무시 4. 신호기 오독 5. 운전자 조치 오류 6. 운전자 판단 오류
		3. 신호원오류에 의한 사고 (OR)	1. 신호원통신오류 2. 신호원취급오류
		4. 신호기장애에 의한 사고 5. 환경조건에 의한 사고 6. 열차장애에 의한 사고	1. 제동장치오류 2. 추진장치오류
	2. 열차-선로지장물 충돌사고 (OR)	1. 인적오류 (OR)	1. 침입자의 지장물 설치 2. 철도관계자의 지장물 설치
		2. 열차-지장물 충돌 (OR)	1. 선로에 침입한 동물 2. 철도구조물의 파편 3. 산사태 4. 열차에서 탈락한 구성물 5. 선로위 교량에서 추락한 장애물 6. 승강장에서 추락한 장애물
	3. 열차-열차 충돌사고(역구내) (OR)	1. 운전자오류 2. 열차오류 (OR)	1. 제동장치오류 2. 차상장치오류 3. 차륜-궤도간 접촉력 약화

그림 1 열차충돌사고 FTA

열차사고에서 가장 큰 부분을 차지하는 것은 열차충돌사고이며, 열차충돌사고에서 가장 많은 부분을 차지하는 것은 열차간 충돌사고와 건널목 충돌사고이다. 철도건널목 안전기준에 대해서 별도로 분석이 이루어지고 있기 때문에, 본 논문에서는 철도건널목 부분을 포함하지 않았다.

열차간 충돌사고를 유발하는 위험원은 FTA에서 보여주고 있듯이 정보오류, 운전자오류, 신호원오류, 신호기장애, 선로변 환경 및 열차장애로 구분된다. 운전자오류를 구성하는 위험원이 열차충돌사고에 미치는 영향이 매우 크다. 운전자오류의 위험원은 신호기확인실패, 신호기정보에 대한 조치 실패, 운영규정무시, 신호기 오독, 운전자 조치 오류 및 운전자 판단 오류 등이 있다. 이러한 위험원에서 운전자의 신호기 확인 실패가 열차충돌사고에 미치는 영향이 매우 크다.

철도신호설비는 철도사고의 FTA의 위험원을 제거 또는 감소시켜서, 철도신호설비의 임무를 충실히 수행하여야 한다. 현재 국내에서 운용중인 고속철도의 ATC(Automatic Train Control)와 현재 개량중인 기존선의 ATP(Automatic Train Protection)와 같은 신호설비는 그림 1의 FTA의 위험원을 제어하는 것이 가능한 것으로 판단되며, 현재 운용중인 ATS(Automatic Train Stop)에 대해서는 제어가능한 위험원의 범위를 분석하는 것이 필요한 것으로 사료된다.

3. 철도신호설비의 안전기준(안)

철도사고에 대한 FAT를 토대로 철도신호설비에 요구되는 안전기준(안)의 내용을 작성하였다. 본 안전기준(안)을 작성함에 있어, 현재 제정되어 적용되고 있는 관련 법령과의 관계를 확인하는 것이 필요하다. “철도산업기본법”은 철도시설에 대한 정의, “철도안전법”은 철도시설을 안전기준에 적합하게 설치 및 유지관리해야 함을 선언, “철도시설안전기준에관한규칙”은 철도시설의 안전기준과 유지관리에 관하여 필요한 사항을 정의, “철도신호지침”은 신호보안설비의 설치기준과 유지관리에 관한 사항을 규정 등을 내용으로 한다.

이 같은 법령과 철도사고에 FTA를 내용을 토대로 작성한 철도신호의 안전기준(안)을 철도신호설비 일반, 철도신호설비 안전성활동, 철도신호설비 구성품(임무, 설치 및 취급), 신호설비유지관리로 구성하였다.

철도신호설비 일반은 국내 법령의 분석내용을 토대로 철도신호설비에 요구되는 신호설비의 임무, 신호설비의 구조, 신호설비의 설치 및 보호, 신호설비의 선정, 신호설비의 성능저하 및 신호설비의 변경 및 추가를 조항으로 하고 있다.

표 3 철도신호설비 안전기준(안)의 철도신호설비 일반

설비의 임무	철도신호설비는 열차간격제어와 열차진로제어를 통하여 열차 또는 차량의 운전을 안전하게 보호하며, 열차운영효율을 높여야 한다.
설비의 구조	철도신호설비는 본 설비의 임무를 충실히 수행하기 위해서 고장 발생 시 안전측으로 동작하는 Fail-safe구조 및 다중계 구조를 적용하여 안전성, 신뢰성, 가용성 및 유지보수성을 확보한다.
설비선정	철도신호설비 안전성활동을 통하여 안전성이 검증된 철도신호설비를 선정하여 설치하여야 하며, 무인자동운전설비를 선정할 경우 열차에 탑승한 승객이 대피할 수 있는 충분한 대피선로 또는 대피시설을 확보해야 한다.
설비의 성능저하	철도신호설비의 정상적인 운용인 곤란한 경우, 이동허가를 받은 열차가 목표위치 또는 목표지점까지 안전하게 주행할 수 있도록 열차를 보호하여야 한다.
설비변경 및 추가	운용중인 철도신호설비를 변경하거나 철도신호설비를 추가하는 것으로 인하여 철도안전에 영향을 주지 않도록 하여야 한다.

철도신호설비 안전성활동은 FTA결과를 내용으로 철도신호설비가 고려해야 할 철도사고의 종류, 철도사고를 유발하는 위험원을 조항으로 하고 있다.

표 4 철도신호설비 안전기준(안)의 안전성활동

안전성활동	안전성활동의 주체, 안전성 목표, 안전성활동 보증업무
열차간 충돌사고관련 위험원	신호기와 관련한 오류 열차상태정보와 관련한 오류 열차운전자 또는 운전취급자와 관련한 오류 철도신호설비가 설치된 선로의 환경조건에 등에 의한 신호설비 오류 열차속도제어와 관련한 오류 철도신호설비를 구성하는 장치의 고장
열차와 지장물관련 충돌사고관련 위험원	지장물이 승강장에서 선로로 낙하 철도관련 구조물 또는 기타 시설물에서 탈락한 지장물이 열차주행선로로 낙하 열차에서 탈락한 차량구성품이 열차주행로로 낙하 절개지 붕괴 또는 산사태로 발생된 토석의 열차주행로 차단 유지보수차량
열차-차막이 충돌사고관련 위험원	열차속도제어와 관련한 오류 기관사와 관련한 오류 열차제어장치의 고장
열차탈선사고관련 위험원	운전취급자, 건널목관리자, 현장작업자 및 입환작업자와 관련한 오류 선로진환기와 관련한 오류 열차과속과 관련한 오류 열차충돌사고에 의한 열차탈선 철도교량, 궤도 등의 뒤틀림 폭우, 폭설, 지진 및 강풍
건널목사고관련 위험원	열차운전자의 오류 신호원 및 건널목 관리자의 오류 건널목 구간에서 열차의 과속주행
인명사상관련 위험원	역 승강장의 승객추락사고, 현장작업자 등에 대한 보호
화재/폭발사고 관련 위험원	철도신호설비의 전기회로가 과열, 누전 또는 아크로 인하여 발화원 또는 폭발 사고원이 되지 않도록 보호하여야 한다.

철도신호설비 구성품(임무, 설치 및 취급) 및 신호설비유지관리는 철도신호지침에 포함되어 있는 조항을 선언하는 선에서 정리하였다.

4. 결론

철도사고에 대한 FTA결과, 철도신호설비는 철도사고중 열차사고의 감소에 영향을 주고 있으며, 다른 사고에 미치는 영향은 미미한 것을 확인하였다. 이에 철도신호설비가 대상으로 할 열차사고의 종류와 열차사고별로 고려해야 할 위험원을 작성하였다. 또한, 이러한 분석결과와 국내 법률체계를 고려한 철도신호설비안전기준(안)에 포함할 대상(또는 내용)을 작성하였다.

철도안전법을 포함한 철도신호설비안전기준(안)을 적용할 경우 철도건설 및 운영기관에 미치는 영향이 클 것으로 예상되므로, 현장의 의견과 정부정책의 의지를 고려하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 김영태(2006년), “철도신호제어시스템”, 테크미디어.
2. Railtrack(2000), "Engineering safety Management Issue 3, Yellow Book 3", Chapter 8.
3. RSSB(2003), "Profile of safety risk on the UK mainline railway Issue 3".
4. 법률 제6955호, “철도산업기본법 제3조(정의)”.
5. 법률 제7796호, “철도안전법 제25조(철도시설의 안전기준)”
6. 건설교통부령 제476호, “철도시설안전기준에관한규칙 제1조(목적), 제4조(세부기준)”