

위험도 평가기법을 적용한 철도시스템의 안전관리

A Basic Study on the Railway Safety Management Based on Risk Assessment Approach

김상암*
Kim, Sang-Am

왕중배**
Wang, Jong-Bae

곽상록***
Kwak, Sang-Log

이동하****
Lee, Dong-Ha

ABSTRACT

Risk Management does not mean accepting a risk but having a good grasp of, eliminating and controlling the exact causes of known hazards. Good safety management plan or system for the safety of any systems need to include the procedures about standing safety goals, related technical information, time schedule, audit programs, etc at least. In this paper the summaries on general risk assessment techniques and the examples of risk assessment system and railway risk management strategies used in UK, Australia and Canada are introduced, and applicable establishment procedures for domestic railway industries are proposed.

1. 서론

철도시스템은 사람, 규칙/절차, 기반설비 및 열차 등이 복잡하고 상호 의존적으로 연계되어 있다. 이중 사람과 운용절차는 여전히 기존의 전통과 안전 문화에 의존하지만, 기반설비 및 열차의 운행은 철도의 고속화와 더불어 자동화, 정보화가 이루어지면서 시스템 안전에 대한 성능보장을 근본적으로 요구받고 있다.

철도시스템과 같은 대규모 시스템의 안전성을 평가하는 방법으로 최근에 주목을 받고 있는 기법은 위험도(Risk) 평가 및 관리 기법이다. 위험도란 사고 위험 요인을 체계적으로 파악하고 위험 요인의 발생 가능성과 이로부터 초래되는 손실의 크기를 동시에 고려하는 복합 개념이며, 위험도의 관리는 관련 시스템에 잠재되어 있는 모든 위험 요인을 체계적으로 파악하여 위험도라는 정량화된 개념으로 표현하고 이를 절감할 수 있는 방안을 비용-편익적 관점으로 추구하는 관리체계이다.

위험도의 관리는 위험도를 수용한다는 뜻이 아니고 위험요인을 파악하고 이를 감소 또는 제거하기 위한 작업을 한다는 것을 의미하며, 고려하는 대상의 안전관리계획 또는 체계에는 최소한 안전목표의 수립, 목표 달성을 위한 관련기술정보, 시간계획 및 절차를 평가하는 자료의 수집, 평가 대상기간의 성취도 평가계획의 수립 단계들을 포함하는 정형화된 절차가 포함되어야 한다.

본고에서는 2장과 3장에 걸쳐 일반적인 위험도 평가기술의 개요와 더불어 영국, 호주, 캐나다의 위험도 평가체계 및 철도시스템의 위험도 관리전략 사례를 소개하고, 4장에서 향후 국내 철도산업계에 적용가능한 철도시스템 안전관리계획 수립 절차를 제시하고자 한다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

**** 수원대학교 산업정보공학과 부교수, 비회원

2. 각 국의 위험도 평가시스템 분석

2.1 영국의 위험평가 모델

영국철도전기공학 및 제어시스템이사회 (British Railtrack Electrical Engineering and Control Systems Directorate) 산하 영국철도시스템안전국(Systems and Safety Department)에서는 관할 기반 설비시스템 및 장비에 대한 잠재 위험요소를 파악하고 이에 대한 위험도 평가시스템을 구축하였다. 여기에는 철도기반설비의 핵심인 신호체계, 원격통신, 급전시스템 등에 대한 위험성 평가가 포함되어 있다. 영국철도안전그룹에서는 PLC제어기반설비(Railtrack PLC Controlled Infrastructure; RCI)에 적용하여 RCI 운용 및 보전 과정 중 발생가능한 잠재적 인명사고위험도를 평가하였다.

(1) 위험도 평가모형의 개발

① 철도기반시설의 위험도 평가모형

철도 기반설비에 대한 위험도 평가 모형은 시설이나 장비로부터 초래될 수 있는 치명적 사건(critical event) 또는 잠재적 위험(hazard)를 파악하고 치명적 사건에 대한 원인분석(causal analysis)과 결과분석(consequence analysis)을 수행한다.

치명적 사건 위험도의 발생빈도는 원인분석을 통하여, 손실의 크기는 결과분석을 통하여 구한다. 원인분석에서는 치명적 사건을 초래할 잠재 원인 전조(cause precursor)들을 파악한다. 장비의 경우 잠재원인전조(pre-cursor)들은 주로 고장모드(failure mode)가 된다. 치명적 사건을 top event로 하고 치명적 사건을 초래할 고장모드를 하향식으로 전개하여 가능한 모든 부품 고장에 이르기까지 Fault Tree Analysis(FTA) 방법을 적용한다. 각 고장모드의 발생빈도는 부품들의 고장을 자료로부터 구하거나 철도 공작창 보전 전문가들의 추정에 의하여 결정한다.

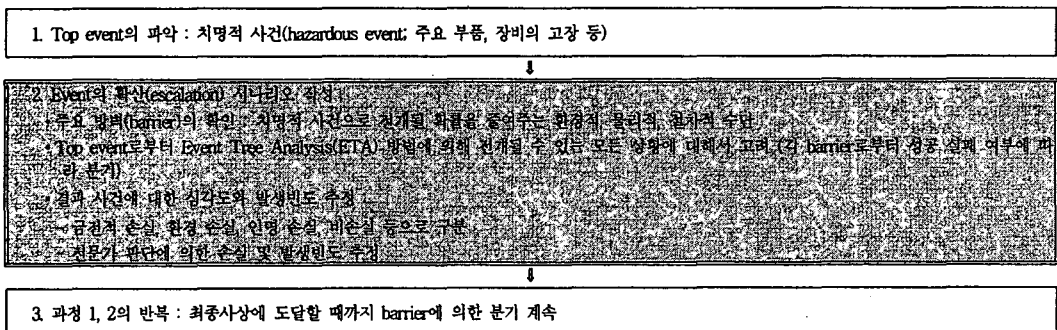
결과분석에서는 치명적 사건이 전개되어 초래할 손실의 크기를 추정한다. 결과분석은 표 1과 같은 과정을 거쳐 진행한다.

② PLC제어기반설비에 의한 잠재사고 위험성평가

철도 PLC제어기반설비(RCI)에 의한 잠재사고 위험도 평가기법도 위험도의 발생빈도는 FTA기법에 의해 추정하고 손실크기는 ETA기법에 의해 추정한다는 점에서 기반설비 및 장비 고장에 따른 위험성 평가 기법과 동일하다. 기반설비 위험성평가에서는 장비고장의 발생확률은 부품의 고장률 자료에 의거하여 추정하는 등 분석의 주안점을 장비고장에 두어 하드웨어신뢰도 평가 기법과 동일하게 진행했으나, RCI에 의한 잠재사고 위험성 평가는 인적요인이 위주가 되는 인명 손상 잠재 사고에 주안점을 두어 인간신뢰도 평가 측면을 강조하여 고려하였다.

위험도로서 고려되는 손실의 범위도 다르다. 기반설비 및 장비고장에 따르는 위험도 평가에서는 인

<표 1> 결과모델의 전개과정



명손상, 재산상 손실, 시간손실, 정거장에서의 불편, 환경상 손실까지 다양하게 설정되었으나 잠재사고의 위험도 평가에서는 모든 손실을 인명손상척도로 단일화하여 측정하였다. 여기에서 사용한 위험도 척도의 두 요소는 등가 사망자수(equivalent fatalities/year)와 발생빈도이다. 위험요소로 고려하는 대상도 기반설비 및 장비 고장에 따른 위험성 평가기법에서는 장비고장을 top event로 선정했으나 RCI에 의한 잠재사고 위험성 평가 기법에서는 인명손상 사고를 top event로 선정하였다. 즉 top event로서 발생빈도는 작으나 인명손상이 큰 열차사고(train accident), 발생빈도는 비교적 크지만 인명손상이 작은 이동사고 (movement accident), 화재 등의 비이동사고(non-movement accident)가 top event로 선정되었다는 점이 차이가 있다.

(2) RCI에 의한 잠재사고 위험도 평가

① 위험요인 분석 및 RCI에 의한 잠재사고 분류

영국철도안전그룹은 사고에 의해 발생할 수 있는 경상자, 중상자, 사망자 수를 통틀어 하나로 통합한 등가사망자수를 위험도의 손실척도로 사용하였다. 사고 피해 관련 대상자의 범위는 승객(passenger), 승무원 또는 직원(staff), 불특정 일반 대중(member of public; MOP)까지 포함한다. 이벤트당 등가사망자수는 Passenger Fatalities, Staff Fatalities 및 MOP Fatalities의 합에다가 Passenger Major Injury, Staff major injury 및 MOP Major Injury의 합에 0.1배를 한 것과 Passenger minor Injury, Staff minor injury 및 MOP Minor Injury의 합에 0.005배를 한 것의 총합으로 구해진다. Event 발생빈도는 연간 event의 평균 발생횟수 (events/yr)로서 통계치와 전문가의 추정치로부터 구한다. RCI에 의한 잠재사건의 위험도 척도는 연간 equivalent fatalities (equivalent fatalities/yr)로 표현되며 전체리스크는 사건 당 등가사망자수를 연간 사건의 평균 발생 횟수와 곱하여 철도전반에 대한 위험도는 각 잠재사고의 위험도 총합으로부터 구해진다. 백년이상의 철도 운영 경험과 그 동안 축적된 사고자료를 바탕으로 영국철도안전그룹에서는 RCI에 의한 잠재사고를 크게, 열차/이동중/비이동사고로 분류하고 다시 세분하여 총 110가지의 사고 유형으로 분류하고 있다.

② 발생빈도의 추정

열차사고는 실제로 자주 일어나는 사고가 아니므로 사고 통계가 풍부하지 않다. 따라서 발생빈도와 손실의 크기를 추정하는 과정에서 경험자료보다는 전문가의 추정이 차지하는 비중이 크다. 열차사고의 발생빈도는 열차운행 마일당 발생 돌발사건(incidents-탈선, 충돌, 화재등)수로서 추정한다. 열차사고의 발생빈도를 추정하는 과정에서 incident까지 포함하는 이유는 다량의 인명을 손상시킬 수 있는 손실의 잠재성 때문이다. 즉 실제 사고로 이어지지 않아 인명손실이 없다 하더라도 incident가 누적된다는 것은 위험도의 손실측면의 값이 커짐을 의미하므로 열차사고 위험도 산정에는 incident를 포함하는 것이다. 발생빈도 추정에는 FTA기법을 사용하여 분류된 잠재사고를 top event로 하고 top event의 원인 전조들을 파악하여 AND나 OR gate를 사용하여 하향식으로 전개한다. 각 원인전조의 발생확률은 사고통계나 전문가 추정으로 입력한다. 발생빈도 추정 후에는 손실의 크기를 ETA기법을 적용하여 추정한다. 잠재 사고의 fault sequence 전개 과정에서 고려되는 원인전조에 따라서 손실의 크기가 달라질 수 있다.

③ 결과 평가

열차사고의 결과(consequence)에 대한 손실 평가는 도출된 각 fault sequence에 대해 그 결과로 발생한 사상자(사망자 및 중상자) 수에 의해 결정된다. 사고에 의해 피해를 입은 승객, 직원, 일반 대중(일반인)이 대상자가 된다. 열차사고는 실제 발생빈도가 낮은 대형 사고가 대부분이므로 손실의 크기는 주로 추정에 의해 결정된다. FTA 및 ETA 분석 과정에서 원인과 결과에 대한 정량화에 필요하지만 자료가 없는 경우에는 인적오류평가및감소기법(HEART)과 철도안전 및 철도 PLC 전문가들의 판단의 방법으로 자료를 가공하여 사용하였다.

(3) 위험도 경감대책 수립을 위한 비용편익분석

철도시스템에 대한 위험도 평가의 궁극적 목적 중의 하나는 안전성 향상을 위한 투자의 타당성을 평가하는 것이다. 영국철도안전그룹에서는 비용편익분석에 사용하기 위해 다음과 같은 손실환산 공식을 개발하였다. 이와 같은 손실 환산 공식은 보험회사 등에서 동종의 재해사망에 대해 지불하는 비용을 기반으로 하고 각종 손해배상 판례를 참조하여 개발하는 것이 일반적이다.

LUL(런던지하철) QRA에서 비용편익분석을 위한 사망자 환산공식은 영국철도안전그룹이 제시하는 사망자 일인을 막는 가치(VPF)와는 약간 다르다. LUL QRA에서 사망자 일인을 피하기 위해 지불용의가 있는 가치는 1.4 백만 파운드/1 equivalent fatality로서 런던지하철 이사회와 환경교통성의 승인을 받았다.

2.2 호주철도의 위험도 판별과 제어전략 사례

철도 관련 위험은 경험과 자격을 갖춘 관리자의 범-기능적 팀을 투입하여 판별한다. 팀의 구성은 운영관리자, 유지보수 엔지니어, 안전관리자, 신호엔지니어, 승객관리자, 소방관, 독립성을 갖춘 외부 작업보건안전 조사관 및 직원대표로 구성되며 품질관리자에 의해 기능과 권한이 보장된다. 위험판별은 브레인 스토밍 기법을 적용하여 208가지 잠재적 위험을 판별하였다. 중요 위험도를 결정하기 위한 위험도 등급을 정하는 것이다. 위험은 5×5 매트릭스를 사용하여 등급화 되었으며, 이는 각 위험으로부터의 사고발생 가능성과 사고의 심각도를 고려한 것이다. 최고 위험 등급을 가진 21가지 위험은 중요 위험도로 간주되고, 안전관리 시스템의 대부분을 차지한다. 중요 위험도를 포함한 모든 위험도는 위험도 매뉴얼에 모두 모아지고 위험도 평가에 대한 지원으로 관리자에게 분배되며 규정에 근거하여 이들 관리자에 의해 재검토된다.

2.3 캐나다의 안전성 판단기준 설정 사례

철도의 안전성 향상 여부를 판단하기 위해서는 일반적으로 운전사고 또는 열차사고에 대한 열차주행 백만킬로(또는 마일)당 사고발생 건수를 기준으로 사고통계를 집계하여 이를 안전성 판단의 기준으로 분석하고 있다. 그러나 나라마다 철도 수송여건 및 사고보고에 대한 제도적 차이로 운전사고, 열차사고, 운전장애 및 중대사고에 대한 사고구분과 분류가 상이하며, 적용범위 및 포함 내용에서도 큰 차이가 있음을 감안한다면, 이들 자료를 단순 비교하여 철도 운행 안전의 비교지표로 삼기에는 어려운 점들이 대단히 많다. 캐나다 철도의 경우 안전성능은 표 2와 같이 사건종류에 따른 심각도를 안전성능기준으로 삼고 있다. 이렇게 함으로써 안전목표를 단순하고 쉽게 이해할 수 있도록 하는 동시에 정의가 명확하고 일관적으로 적용되도록 하고 있다.

3. 철도 종합 안전관리계획 수립시의 주요내용과 절차

3.1 위험도 평가방법을 통한 안전성능 평가

<표 2> 캐나다 리스크 분류 매트릭스

	심각도 분류					
	최소	경미	한계	심각	치명적	재난
사망자				1명	1명	다수
중상			1명	다수		
경상						
중대한 조차장/선로 불통		20-60분	1-6시간	6-24시간	24-72시간	1주일
경미한 조차장/선로 불통			6시간	6-48시간	1주일	1달
본선 불통		20-60분	1-6시간	6-24시간	24-72시간	1주일
역 불통	20분	3-4시간	1일	2-3일	1주일	1달
위험한 사건		1개의 차량 이탈	탈선, 차량 관통 없음	차량 탈선 및 관통, 적은 수의 제품 손실	차량 탈선 및 관통, 심각한 제품 손실, 인적 부상, 중대한 탈출	차량 탈선 및 관통, 심각한 제품 손실, 인적 부상, 환경 손상, 중대한 탈출
재산 손실	100\$ 초과	1천\$ 초과	1만\$ 초과	10만\$ 초과	1백만\$ 초과	1천만\$ 초과

위험도의 관리는 위험도를 수용한다는 뜻이 아니고 위험요인을 파악하고 이를 감소 또는 제거하기 위한 작업을 한다는 것을 의미하며, 고려하는 대상의 안전관리계획 또는 체계에는 최소한 안전목표의 수립, 목표 달성을 위한 관련기술정보, 시간계획 및 절차를 평가하는 자료의 수집, 평가 대상기간의 성취도 평가계획의 수립 단계들을 포함하는 정형화된 절차가 포함되어야 한다.

첫번째 단계로는 안전 문제 및 관심사 파악으로 높은 가시성 및 참여도를 갖도록 일상적이고 지속적인 형태로 근로자들이 안전 문제 및 관심사를 식별하여야 한다. 사건/사고 조사를 통합하여 입력 데이터, 안전 데이터를 수집/분석한다. 두번째 단계로는 발생빈도와 심각도 평가로서 안전 문제/관심사의 발생빈도 및 심각도를 정성적 또는 정량적으로 평가한다. 심각도 평가에서는 일반적으로 특정 기간동안의 회사 및 산업의 경험에 근거한 평균치에 따른 사망자 및 부상자수, 재산 손실액, 또는 처리비용 및 환경 영향에 따라 측정한다. 세번째 단계는 위험도 평가로 미리 결정된 위험도 분류법을 사용하여 관련 위험도가 수용가능한지, 경감하여 수용가능한지, 또는 수용불가능한지 평가한다. 위험도 평가는 중대성을 평가하고 그 것이 수용가능한지, 경감하여 수용가능한지, 또는 수용불가능한지 판단하는 절차이다. 이들 판단은 미리 결정된 위험도 해결 매트릭스와 같은 위험도 분류법/기법을 이용한다.

위험도 해결 매트릭스들은 다양한 조합의 발생 가능성 및 심각도 분류 등급(행렬)을 가질 수 있다. 등급의 분류 및 정의는 회사의 규모 및 경험에 근거하여 마련하도록 한다. 이 경우 심각도 분류는 몇 가지 서로 다른 차원을 가지며, 안전 문제는 모든 차원에서 “가장 높은” 심각도 등급과 관련된 심각도 분류를 할당받는다. 안전성능은 정확한 보고를 보장하도록 구성된 척도 범위를 통하여 측정한다.

3.2 철도 종합안전관리계획의 주요내용

향후 철도안전관리계획의 수립은 시스템 위험분석을 통한 안전공학적 절차를 준수하여 위험도를 정량적으로 평가하고, 이를 적정 수준으로 관리함으로써 전체 안전성능을 향상 시킬 수 있는 시스템 안전관리 체계로의 개편이 필요하다.

① 안전방침, 연간 안전목표 및 관련 안전기술계획 수립 방안

- 안전 방침의 설정
- 연간 안전 성취 목표 설정 방안 (정량화가 가능하고, 의미가 있어야 하며, 실현 가능하도록 한다.)

② 안전 권한, 책무 및 책임

- 안전관리시스템을 유지보수하고 구축하는 전반적인 책무를 갖는 선임관리자 지정
- 연간 안전기술 계획 및 다양한 안전관리시스템의 구성요소에 대한 책임 지정
- 권한, 책무 및 책임 검증을 위한 세부사항 설정

③ 해당 규정, 규칙, 표준 및 명령에 대한 준수

- 철도안전 규정, 규칙, 표준 및 명령, 그리고 이들에 대한 준수여부를 증명하는 절차를 설정한다.

④ 리스크 관리 절차

- 리스크를 파악하고 이를 감소 또는 제거하기 위한 정형화된 리스크 관리절차 (인적 요인, 제삼자 및 철도 운영과 관련된 중대한 변경사항과 관련된 것들을 포함하는 안전 문제 및 관심사 파악)
- 신규 운영사항 및 기존 운영사항과 관련한 중대한 변경사항에 대한 위험도 분석
- 리스크 분석 문서화, 분석 갱신 절차 (주기적, 중요 사고 이후, 안전 성능이 개선되지 않을 때)
- 선임관리자의 주기적인 분석내용 검토

⑤ 리스크 관리 전략

- 리스크 관리전략은 수용이 불가능하거나 경감시 수용 가능한 것으로 분류된 리스크에 필요하다.

⑥ 사고 및 사건 보고, 조사 및 분석

⑦ 기술, 교육 및 감독

- 근로자 및 기타 모든 사람들이 모든 안전 요건을 준수하도록 보장하기 위한 적절한 자격, 기술 및 교육, 그리고 적절한 감독을 받고 있다는 것을 보장하는 시스템

- ⑧ 안전성능데이터 수집 및 분석(안전성능평가를 위한 데이터 수집 및 분석을 위한 절차)
 - 연간 안전목표에 따라 안전성능을 평가, 기타 통계요건의 충족을 위해 수집하는 안전데이터 파악
 - 사고 및 안전관련 사건에 대한 데이터 수집 시스템
 - 주기적인 데이터 분석 및 리스크 관리절차로의 피드백 절차
 - 조직의 연간 목표와 관련한 안전 성능 평가 및 통계기법을 사용한 경향 파악을 위한 데이터 분석
 - 안전데이터분석에 대한 주기적인 선임관리자의 검토
- ⑨ 안전 감사 및 평가
 - 주기별 내부 안전 감사, 관리자 검토, 모니터링 및 안전관리시스템을 통한 평가 절차 구비.
- ⑩ 교정조치 개발, 승인 및 모니터링
 - 안전관리시스템의 효과의 핵심사항은 교정조치가 수행될 수 있도록 보장하는 피드백 루프이다.
- ⑪ 기록

안전성능을 평가하기 위한 다음 정보 기록을 유지 및 관리하여야 한다.

 - 사고 및 사건조사보고서와 보고 기준에 맞는 사고 및 사건을 위한 교정조치 기술
 - 감독기관의 요구에 따라 안전관리시스템의 효과 및 안전성능을 모니터링하기 위한 규정된 성능 및 안전 데이터를 수집, 유지관리하고 이를 제출하여야 한다.

4. 결 론

본 논문에서는 선진 철도운영국의 위험도평가 기반 안전관리체계 사례를 분석하고 이를 바탕으로 철도시스템의 효과적인 안전관리체계의 수립을 위해 필요한 절차와 최소요건을 제시하였다.

안전관리계획 또는 체계에는 최소한 안전목표의 수립단계, 목표 달성을 위한 관련기술정보, 시간계획 및 절차, 평가에 필요한 자료의 수집단계, 설정된 기간의 성취도 평가계획의 수립절차 등을 포함하는 정형화된 절차가 마련되어야 한다.

그리고 철도 안전관리체계를 선진화하고 정량적 위험도 평가기법을 도입하기 위해서는 다음과 같은 과제들이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

(1) 현행 철도사고 분류체계에서 사고별 원인전조들을 특정 사고와의 인과관계에 관계없이 중복 분류되어 있다. 과거 사고 이력자료를 점검하여 분명한 인과관계가 있는 원인전조들을 선별하여 재구성하여야 할 것이다. 특정 사고와 관련된 원인전조의 구성이 충실할수록 위험도 평가결과가 정확해질 것이다.

(2) 철도선진국이라 할 수 있는 영국, 독일, 프랑스 등지에서 수행되는 철도안전사고 평가시스템을 충실히 벤치마킹하고 이들의 시스템을 국내 적용 가능한 형태로 수정 도입하는 방법이 국내 철도 위험 평가체계를 선진화하는 빠른 방법이 될 수 있을 것이다.

(3) 시스템 안전관리공학기법을 적용한 Hazard 분석과 핵심 분야별 정량적인 Risk(위험도) 평가에 의한 적절한 위험도 관리 수준을 정하여 안전성능의 향상 여부를 판단하고 관리하는 노력을 하여야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] P. Proctor, *Infrastructure Risk Modelling - Elctrification and Plant*, Railtrack EE&CS Report IRM_3 1~37, 1997
- [2] Railtrack, *Rrofile of safety risk on Railtrack PLC-contraolled infrastructure issue 1*, January 2001
- [3] Health & Safety Executive, *Railway Safety*, 1996/1997 England
- [4] O. Nordland, F. Renpenning, "Risk Acceptability Criteria"
- [5] H. Zerkin, R. N. Dumolo, V. Ho, "Benchmarking of the Risk Management Indices"
- [6] Andrew A. Dykes, Cary P. Wolf, "Quantitative Risk Assessment of Railroad Derailment Accidents", *Probabilistic Safety Assessment and Management* 5, 2000