Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol.22, No.1, pp.81-94, February 2003

영국철도시스템에 적용된 리스크평가 사례

Application Cases of Risk Assessment for British Railtrack System

이동하*, 정광태**

ABSTRACT

The British railway safety research group has developed a risk assessment model for the railway infrastructure and major railway accidents. The major hazardous factors of the railway infrastructure were identified and classified in the model. The frequency rates of critical top events were predicted by the fault tree analysis method using failure data of the railway system components and ratings of railway maintenance experts. The consequences of critical top events were predicted by the event tree analysis method. They classified the loss of accident due to railway system into personal, commercial and environmental damages. They also classified 110 hazardous event due to railway system into three categories, train accident, movement accident and non-movement accident. The risk assessment model of the British railway system has been designed to take full account of both the high frequency low consequence type events (events occurring routinely for which there is significant quantity of recorded data) and the low frequency high consequence events (events occurring rarely for which there is little recorded data). The results for each hazardous event were presented in terms of the frequency of occurrence (number of events/year) and the risk (number of equivalent fatalities per year).

Keyword: Risk assessment model, British railway safety, Fault tree analysis, Event tree analysis

* 수원대학교 산업정보공학과
주 소 : 445-743 경기도 화성시 봉담읍 와우리 산 2-2
전 화 : 031-220-2157
E-mail:dhonghal@suwon.ac.kr
** 한국기술교육대학교 디자인공학과

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

1. 서 론

철도시스템과 같은 대규모 시스템의 안전성을 평가하는 방법으로 최근에 주목을 받고 있는 기법은 리스크 평가 및 관리 기법이다. 리스크란 사고 위험 요인을 체계적으로 파악하고 위험요인의 발생가능성과 이로부터 초래되는 손실을 동시에 고려하는 복합 개념이다. 리스크 관리는 관련 시스템에 잠재되어 있는 모든 위험 요인을 체계적으로 파악하여 리스크라는 정량화된 개념으로 표현하고 이를 절감할 수 있는 방안을 비용-편익적 관점으로 추구하는 관리체계이다(이동하 등, 2001). 이미 선진국에서는 원자력, 항공, 군수병참, 교통 체계 분야의 안전성 평가를 위해 성공적으로 도입되었고 우리나라에서는 원자력, 화학공정의 안전성 평가에 도입된 사례가 있다.

본 연구는 리스크 평가 시스템을 한국 철도의 위험분석 및 위험도 평가 모델링 기법에 적용하기 위하여 영국의 철도안전시스템에 적용되고 있는 위험분석 사례와 여기에 적용된 위험도 평가 모델링 기법을 조사하였다. 본 연구에서 주로 참조한 시스템은 영국 철도에서의 철도 안전관리 시스템, 철도기반설비(infrastructure)에 대한 리스크 평가 모델, PLC제어 철도기반설비에 의한 인명사고 리스크 평가 모델, 런던지하철 기반시설에 대한 정량적 리스크 평가 시스템 등이다. 영국 철도 시스템는 역사가 가장 오래되었고 안전성 평가 체계를 오래 전부터 갖추어 운영해 왔으므로 그 동안 축적된 사고 이력 자료가 풍부하고 이에 대한 체계적인 분류 및 분석이 진행되어 왔으므로 분석 결과에 대한 신뢰성은 높은 편이다. 또한 주요 분석 결과가 공개되어 있어 자료에 접근하기 쉬운 장점이 있다.

2. 영국 철도 리스크 평가 시스템

철도시스템은 복잡하고 고도로 상호의존적인 시스템으로서 사람, 규칙/절차, 기반설비 및 점진적 자동화로 구성되었다. 이중 사람과 운용절차는 여전히 기존의 전통과 안전 문화에 의존하지만 기반설비 및 자동화는 점증하는 복잡성과 가용도, 신뢰도 및 안전성의 성능보장에 대한 요구를 받고 있다. 이에 대비한 전략적 주도권을 확보하기 위해 영국 철도 전기공학 및 제어체계이사회 (British Railtrack Electrical Engineering and Control Systems Directorate) 산하 영국 철도 시스템 안전국(Systems and Safety Department)에서는 관할 기반설비시스템 및 장비에 대한 잠재 위험요소를 파악하고 이에 대한 리스크 평가시스템을 구축하였다. 여기에는 철도기반설비의 핵심시스템인 신호체계, 원격통신, 급전시스템 등에 대한 위험성 평가가 포함되어 있다. 동일한 방법론을 영국 철도안전그룹 (British Railway Safety Group)에서는 철도PLC 제어 기반설비 (Railtrack PLC Controlled Infrastructure; RCI)에 적용하여 RCI 운용 및 보전 과정 중에 발생할 수 있는 잠재적 인명 사고 위험의 리스크를 평가하였다. 한편 영국런던지하철에서도 지하철 운용체계에서

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

발생할 수 있는 사고유형을 좀 더 단순화하여 지하철 각 노선 관리 회사별로 동일한 사고에 대한 리스크를 정량적으로 평가하였다. 이 정량화된 리스크 수치에 의해 각 노선 관리 회사의 시스템 안전성을 비교평가 할 수 있게 하였다.

2.1 영국철도 기반설비 시스템 및 장비에 대한 리스크 평가 모형

영국 철도 시스템 안전국에서 도입한 기반설비시스템 및 장비에 대한 리스크 평가 모형은 철도 기반시설이나 장비의 위험성 평가에 적용되는 모델로서 장비로부터 초래될 수 있는 치명적 사건 (critical event) 또는 잠재위험 요소(hazard)를 파악하고 치명적 사건에 대한 원인분석(causal analysis)과 결과분석(consequence analysis)을 수행한다 (Profile of Safety Risk, 2001). 치명적 사건 리스크의 발생빈도는 원인분석을 통하여, 손실의 크기는 결과분석을 통하여 구한다.

원인분석에서는 치명적 사건을 초래할 잠재원인 전조(cause precursor)들을 파악한다. 장비의 경우 잠재원인전조들은 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 고장률 자료로부터 구하거나 철도 공작창 보전 전문가들의 추정에 의하여 결정한다.

결과분석에서는 치명적 사건이 전개되어 초래할 손실의 크기를 추정한다. 결과분석은 다음 과정으로 진행한다.

1. top event가 될 수 있는 치명적 사건 (hazardous event : 주요 부품, 장비의 고장 등)을 파악한다.
2. event의 확산 (escalation)을 막는 주요 방벽 (barrier)을 확인하고 top event가 확산되어 최선의 손실 또는 최악의 손실을 발생시킨다는 시나리오를 작성한다. 여기서 barrier란 critical event가 바람직하지 않은 consequence에 이를 확률을 줄여주는 수단을 의미한다. barrier의 종류는 다음과 같다.
   a) 인간 환경 barrier : 환경, 인간 부재 등의 우연 기회로 확산이 방지되는 barrier를 말한다.
   b) 물리적 system barrier : 하드웨어에 의한 protection barrier
   c) 절차 barrier : 절차에 의한 protection barrier

top event로부터 Event Tree Analysis (ETA) 방법에 의해 전개될 수 있는 모든 상황에 대해서 고려할 수 있는 모든 barrier를 입력한다. 각 barrier로부터 성공 실패 여부에 따라 분기한다. barrier가 성공하면 안전한 결과로 분기하고 barrier가 실패하면 좀더 위험한 결과로 분기한다. 물론 여러 barrier를 건너 뛸 경우도 고려한다. 각 barrier 결과에 대해 발생된 consequence event에 대해 년간 장비운용당 또는 installation 당 손실의 발생빈도를 전문가 판단에 의거하여 추정하고 입력한다. barrier 결과 발생된 최종 consequence event는 금전적 손실, 환경

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

손실, 인명 손실, 비손실로 구분하고 전문가 판단에 의거하여 손실 및 발생빈도를 추정토록 한다. 경우에 따라서는 consequence 분류체계를 이용할 수 도 있다. 이 분류체계에 의하면 리스크로서 고려할 수 있는 손실의 범위는 인명 손상 외에 금전적 자산 손실, 시간지연, 정거장에서의 불편, 환경상 손실에 이르기까지 폭넓게 설정되었다.

3. 더 이상의 barrier가 파악되지 않고 모든 주요 consequence에 도달할 때까지 결과 분석 과정 1, 2를 반복한다. consequence의 범위는 위험하기는 하지만 큰 피해 없는 비교적 안전한 상태 (비손실)로부터 환경, 인명 및 재산 상실에 이르는 모든 손실을 포함하여야 한다.

2.2 영국철도PLC제어기반설비에 의한 잠재사고 위험성평가

영국철도안전그룹에서 수행한 영국 철도 PLC제어기반설비(RCI)에 의한 잠재사고에 대한 리스크 평가기법도 리스크의 발생빈도는 FTA기법에 의해 추정하고 손실크기는 ETA 기법에 의해 추정한다는 점에서 영국철도안전 시스템국에서 수행한 기반설비 및 장비 고장에 따른 위험성 평가 기법과 동일하다. 다른 점은 기반설비 및 장비고장에 따른 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 측면의 고려가 강조된 점이다 (Infrastructure Risk Modelling, 1997). 따라서 리스크로서 고려되는 손실의 범위도 기반설비 및 장비고장에 따르는 리스크 평가에서는 인명손상, 재산상 손실, 시간손실, 정거장에서의 불편, 환경상 손실까지 다양하게 설정되었으나 잠재사고의 리스크 평가에서는 모든 손실을 인명손상척도로 단일화하여 측정하였다. 여기에서 사용한 리스크 척도의 두 요소는 년간 발생 동등 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. 따라서 인적요인에 따른 철도사고 분석에는 영국철도안전그룹에서 개발한 RCI에 의한 잠재사고 위험성 평가 기법이 좋은 모델이 될 수 있다.

2.2.1 RCI에 의한 잠재사고 리스크 척도

영국철도안전그룹은 사고에 의해 발생할 수 있는 경상자, 중상자, 사망자 수를 통틀어 하나로 통합한 동등사망자수를 리스크의 손실척도로 사용하였다. 사고 피해 관련 대상자의 범위는 승객 (passenger), 승무원 또는 직원 (staff), 불특정 일반 대중 (member of

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

public; MOP)까지 포함한다. 동등사망자 수는 다음 과정으로 산출한다.

passenger fatalities: 조사기간 중 발생한 event 당 평균 승객 사망자 수,

passenger major injury: 조사기간 중 발생한 event 당 평균 승객 중상자 수,

passenger minor injury: 조사기간 중 발생한 event 당 평균 승객 경상자 수,

staff fatalities: 조사기간 중 발생한 event 당 평균 직원 사망자 수,

staff major injury: 조사기간 중 발생한 event 당 평균 직원 중상자 수,

staff minor injury: 조사기간 중 발생한 event 당 평균 직원 경상자 수,

MOP fatalities: 조사기간 중 발생한 event 당 평균 일반 대중 사망자 수,

MOP major injury: 조사기간 중 발생한 event 당 평균 일반 대중 중상자 수, 그리고

MOP minor injury: 조사기간 중 발생한 event 당 평균 일반 대중 경상자 수라 하자. 그러면 event 당 equivalent fatalities는:

event 당 equivalent fatalities = passenger fatalities + staff fatalities + MOP fatalities
+ 0.1(passenger major injury + staff major injury + MOP major injury)
+ 0.005(passenger minor injury + staff minor injury + MOP minor injury).

event 발생빈도는 연간 event의 평균 발생횟수 (events/yr)로서 통계치와 전문가의 추정치로부터 구한다. RCI에 의한 잠재사건의 리스크 척도는 년간 equivalent fatalities (equivalent fatalities/yr)로 표현 되며 다음 공식으로부터 구해진다.

total risk (년간 equivalent fatalities) = event 당 equivalent fatalities X 연간 event의 평균 발생횟수

철도전반에 대한 risk = sum(각 개별 잠재사고의 risk)

2.2.3 RCI에 의한 잠재사고 분류

백년이상의 철도 운영 경험과 그 동안 축적된 사고자료를 바탕으로 영국철도안전그룹에서는 RCI에 의한 잠재사고를 크게, 열차사고, 이동중사고, 비이동사고로 분류하고 각각을 다시 세분하여 총 110가지의 사고 유형으로 분류하였다.

(1) 열차사고 유형

열차사고는 발생빈도는 작으나 일단 사고가 발생되면 다수의 인명이 사망할 수 있는 종류의 사고 24 가지 분류로 구성되었으며 주로 열차간 충돌, 열차-기타 차량과의 충돌, 열차 탈선, 열차 화재, 열차 폭발 등의 사고가 포함되어 있다 (표 1).

열차사고의 리스크 추정치에 영향을 주는 요소는 승객 탑승 loading, 열차 속도 및 사건발생 후 이차 영향의 유무(인접 line에 있는 열차와의 충돌, 화재 등)이다. 이러한 영향을 고려하여 열차사고는 각 사고에 대해 세

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

부사건으로 세분류가 가능하다. 예를 들어 HET 1으로 분류된 두 승객열차간 충돌 사고는 충돌 속도 (fast, slow)에 따라 충돌 유형(전방, 후미, 측면)에 따라 추가로 분류할 수 있다. 또 다른 예로는 HET 12로 분류된 승객열차 탈선의 경우 탈선속도(fast, slow)에 따라 탈선 장소 (open track, 단선 터널, 복선 터널, 교량 위, 고가교 위, 정거장)에 따라 추가 분류가 가능하다.

표 1에서 보는 바와 같이 열차사고는 실제로 자주 일어나는 사고가 아니므로 사고 통계가 풍부하지 않다. 따라서 발생빈도와 손실의 크기를 추정하는 과정에서 경험자료보다는 전문가의 추정이 차지하는 비중이 크다. 발생빈도를 추정하는 과정에서도 적어도 수 백년 간의 조업기간 중에 발생할 수 있는 가능성을 고려해야 한다. 열차사고의 발생빈도는 열차운행 마일당 발생 돌발사건(incidents-탈선, 충돌, 화재등)수로서 추정한다. 여기서 incident는 사상자가 발생하지 않은 돌발사건, 또는 아차사고 (near miss)를 포함한다. 이와 대비되는 개념으로 사고(accident)는 사상자가 발생한 사고로서 활동의 정상적인 과정을 방해하는, 계획되지 않은, 때로는 상해를 입히거나 재산상의 손상을 초래하는 사상(event)을 의미한다. 사고는 반드시 불안전 행동이나 불안전 상태가 선행되어 야기되며 위험성 구명의 실패나, 현존하는 위험성 제어 시스템내의 부적합으로부터 초래된다. 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 리스크의 손실측면의 값이 커짐을 의미하므로 열차사고 리스크 산정에는 incident를 포함하는 것이다. 열차사고 발생빈도 산정시 영국철도안전그룹에서 특별히 예외를 두는 부분은 HET 4(철로 위의 물체와 열차간의 충돌), HET 16 (비정상적인 강한 동력; abnormal dynamic force)의 경우인데 이 경우에는 실제로 부상이상을 야기한 accident의 발생 수만 사용한다.

표 1. RCI에 의한 잠재사고 분류 중 열차사고 유형

열차사고		
위험분류번호		위험사건 내용
HET	1	승객열차간 충돌
HET	2	승객열차-비승객열차간 충돌
HET	3	비승객열차간 충돌
HET	4	선로상의 물체와 충돌(탈선은 안됨)
HET	5	큰물체와의 충돌로 차체가 손상됨
HET	6	정거장내에서의 승객열차간 충돌(permissive working)
HET	7	정거장내에서의 승객열차-비승객열차간 충돌
HET	8	정거장내에서의 비승객열차간 충돌
HET	9	buffer stop 상태에서의 충돌
HET	10	건널목에서의 차량-승객열차간 충돌
HET	11	건널목에서의 차량-비승객열차간 충돌
HET	12	승객열차 탈선
HET	13	비승객열차 탈선
HET	14	정거장에서의 승객열차 탈선
HET	15	정거장에서의 비승객열차 탈선
HET	16	비정상적 급감속, 가속
HET	17	정거장에서의 승객열차 화재
HET	18	승객열차 화재
HET	19	정거장에서의 화물열차 화재
HET	20	화물열차 화재
HET	21	구조물 또는 큰물체에 의한 열차 파손
HET	22	정거장에서의 구조물 붕괴
HET	23	승객열차에서의 폭발
HET	24	화물열차에서의 폭발

발생빈도 추정에는 영국 철도 시스템 안전

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

국에서 도입한 기반설비 및 장비 고장에 의한 리스크 평가시와 마찬가지로 FTA기법을 사용한다. 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. 역시 분류된 잠재사고를 top event로 하고 2.1절에 제시한 ETA 적용과정을 반복하여 fault sequence를 전개한다.

잠재 사고의 fault sequence 전개 과정에서 고려되는 원인전조에 따라서 손실의 크기가 달라질 수 있다. 다음은 열차 탈선 사고 후 손실의 크기에 영향을 미칠 수 있는 시나리오 상황의 예를 보여 준다.

a) 탈선 후 열차간 정상 간격 (normal clearance)유지
b) 탈선 후 정상간격을 벗어났지만 구조물이나 인접 노선상의 열차와의 이차 충돌이 없는 경우
c) 탈선 후 정상간격을 벗어나고 구조물과 이차 충돌이 있는 경우
d) 탈선 후 정상간격을 벗어나고 인접 노선상의 열차와 이차 충돌이 있는 경우
e) 손상정도
f) 응급구조반이 사고현장에 도착하는 속도

열차사고의 결과 (consequence)에 대한 손실 평가는 도출된 각 fault sequence에 대해 그 결과로 발생된 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.

영국철도안전그룹 (Accident Consequence Modelling, 1997)은 열차 종류, 열차 당 객차 수, passenger loading (탑승객 수)에 따라 서로 다른 결과를 산출하는 개발한 Layout Risk Model을 개발하였다. 이 모델에서 사용한 열차종류의 예는 다음과 같다.

a) Mark 1 multiple unit
b) Mark 3 multiple unit
c) Mark 1 Loco hauled stock
d) Mark 3 Loco hauled stock
e) 위험하지 않은 화물적재 화물열차
f) 위험화물 적재 화물열차

이 충돌 결과에 대한 손실 추정모델의 기반자료는 1967-1997년간 사상자가 발생된 모든 충돌사고 자료였다. 이 충돌사고자료를 검토하여 상정 가능한 시나리오를 만들고 각 시나리오에서 발생할 수 있는 사망자, 중상자, 경상자를 구분하고 이로부터 equivalent fatality 수를 산출하였다. 이 모델을 이용하면 예를 들어 정면충돌의 경우 기관차의 종류, 선행 칸에 탑승한 승객 수에 따라서 공학적 판단을 하고 이에 따라 충돌결과 손실을 산출할 수 있다.

그밖에 경험자료가 부족한 열차사고의 경우에는 전적으로 전문가의 구조적 판단에 의존하여 손실을 추정하였다. 열차사고 손실 추정을 위한 전문가 판단 시 고려사항은 다음과 같다.

a) 영국 내 및 해외 열차사고 경험자료
b) 차량의 특성
c) 사고 시 열차 속도

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

d) 사고 시 대피 및 소개 조건

e) 경험적으로 유사한 두 fault sequence 간의 차이점

사망자 및 중상자수는 fault sequence에 영향을 받은 승객에 대한 비율로서 파악된다. 경상자수는 상기 고려조건을 감안하여 별도로 산출한다. 손실 추정을 위한 ETA에는 야간 운행, 비수기, 성수기, 만차의 영향을 고려할 수 있도록 구성한다. 승무원과 일반 대중 사상자 수는 각 fault sequence에 대해 개별적으로 추정하되 과거의 경험자료와 전문가의 구조적 판단에 의존하여 결정한다.

FTA 및 ETA 분석 과정에서 원인과 결과에 대한 정량화에 필요하지만 자료가 없는 경우에는 다음의 방법으로 자료를 가공하여 사용하였다.

a) Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART)

b) 철도안전 및 철도 PLC 전문가들의 판단

열차사고의 위험성 평가에는 경험자료보다는 전문가의 추정 비중이 크고 추정과정에는 여러가지 가정이 기초를 이루고 있다. 따라서 주요 가정에 대한 민감도 분석이 필수적이다. 특히 낮은 발생빈도와 큰 손실에 대한 추정시 사용되는 가정의 타당성에 대한 점검이 요구된다. 열차사고 위험성 평가시 추정치들은 다음의 주요 가정과 예측에 민감하다.

a) 충돌이나 탈선 후 사고 열차가 인접 노선을 가로막은 경우, 인접노선의 열차와의 이차 충돌을 일으킬 확률은 다음 요인에 영향을 받는다.

- 사고열차에 의해 통신선로가 차단된 경우 인접 노선 상의 열차에 위험 신호가 보내지는데 소요되는 평균 시간
- 인접노선상의 열차 기관사가 사고를 목격하고 정지할 확률
- 인접노선 열차의 주행속도

이중 가장 불확실한 가정은 인접노선열차에 (사고열차에 의해 통신선로가 차단된 경우) 위험신호가 전달되는데 소요되는 평균시간이다. 실제 분석 과정에서는 전문가 판단에 의해 3분으로 가정되었다. 이 가정은 열차화재 발생 후 승객을 노변으로 소개시키기 위해 차량을 정지시켜야 하는 경우에도 적용되었다. 만일 3분이라는 추정치를 바꾸면 충돌, 탈선, 화재 사고의 리스크 전반에 유의한 영향을 미칠 수 있다.

b) 충돌 및 탈선 후에 화재가 발생할 다음의 확률 추정치는 리스크 예측에 큰 영향을 미칠 수 있다.

- 승객열차 탈선 시: 1/100 (100탈선당 1건)
- 인화성 화물적재열차와의 충돌 시: 1/10

c) 야간, 비수 시간대, 성수 시간대, 만차 시간대 및 탑승객 수에 대한 가정은 탑승객 수 가정에 대해 변화가 있을 경우에 리스크 예측 전반에 영향을 준다.

d) 위험화물을 적재한 경우 (위험화물 적재확률은 비교적 정확하게 알려져 있음), 위험화물이 독극성(toxic) 이 있을 확률은 다음과 같이 추정한다. 즉 화물열차의 14%는 위험화물을 적재하고 이중 20%는 독극성물질을 적재한다고 가정하고 있다. 충돌, 탈선, 화재, 폭발 후 독극물이 누출되면 철도시설

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

밖의 일반 대중에게서 평균 30 equivalent fatality가 발생한다고 가정하고 있다. 이 추정치는 손실이 크게 발생할 수 있는 인구밀집지역에서는 독극물 누출 사건의 발생가능성이 작을 것이라는 가정과 손실이 작게 발생할 수 있는 인구희소지역에서는 독극물 누출 사건의 발생가능성이 클 것이라는 가정에 기반을 두고 있다.

e) 승객 열차 화재 후 기차가 정거장에 도착하지 못할 확률의 경우, 경험자료에 의하면 열차 화재 후 기차가 정거장에 들어오지 못해 승객이 선로에 소개되는 경우는 거의 없었다. 따라서 열차 화재 후 기차가 정거장에 들어오지 못해 승객이 선로에 소개될 확률은 1/5로 가정되었다. 만일 이 확률이 커진다면 승객 열차 화재의 전반적 리스크는 더욱 커질 수 있다.

f) (특히 디젤기관차가 포함된) 승객열차 화재 후 터널 안에서 정차해야 할 확률의 경우 e)의 경우와 마찬가지로 화재 후 터널 입구나 안에서 정차할 확률은 1/5로 가정되었다. 그러나 디젤연료를 사용하는 열차가 포함된 화재가 터널 안에서 발생된다면 그 손실이 매우 커질 수 있으므로 이 확률이 약간만 증가해도 승객열차화재의 리스크 예측에 미치는 영향은 대단히 클 것이다.

g) (특히 디젤기관차가 포함된) 승객열차가 터널 안에서 화재가 난 경우, 열차 화재로 인해 열차가 터널 안에서 정차하게 되고, 승객이 선로로 소개되어야 하고, 디젤연료를 사용하는 열차가 포함된다면 손실은 대단히 커질 수 있으므로 손실 추정치로서 승객의 90%가 사상자가 될 수 있다고 가정했다. 이런 비관적 손실 크기를 줄인다면 열차화재에 대한 리스크 추정 전반에 큰 영향을 줄 수 있다.

h) 방화에 의한 승객열차내부의 화재 발생빈도 추정치의 경우 과거의 경험에 따라 열차내 방화는 비수 시간대에 발생하는 것으로 가정하였다. 만일 성수 시간대에 방화에 의한 화재가 일어난다면 열차내부화재에 의한 리스크는 실제보다 낮게 추정되는 셈이다.

열차사고의 리스크 추정치에 대한 민감도 분석 과정에서 리스크 추정치에 영향을 주는 중요 요소 중의 하나는 총 리스크 기여하는 원인전조들이다. 고려 대상이 되는 원인전조를 얼마나 충실히 파악했는지에 따라 리스크 추정치의 정밀도가 결정된다.

(2) 이동사고

RCI에 의한 잠재사고 중 이동사고는 주행 열차로부터 승객이 추락하거나 승객이 플랫포옴으로부터 추락하여 열차에 치이는 등의 열차 또는 그 밖의 이동 물체와 사람과의 직접적 접촉에 의한 사고들을 분류한다 (표 2). 이동사고는 발생빈도는 크지만 인명 피해는 사고에 관련된 개인에게 국한되므로 손실의 크기는 비교적 작다.

표 2에서 보는 바와 같이 이동사고는 실제로 자주 일어나는 사고이므로 사고 통계가 비교적 풍부하다. 따라서 발생빈도와 손실의 크

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

기를 추정하는 과정에서 경험자료가 차지하는 비중이 크다. 물론 사고 통계가 부족한 경우에는 전문가의 판단도 활용한다. 발생빈도를 추정하는 과정에서는 수 십 년간의 조업기간 중에 발생할 수 있는 가능성을 고려한다. 이동사고의 발생빈도는 열차운행 마일 당 발생 사고 수로서 추정한다. 사고는 사상자가 발생한 사고로서 활동의 정상적인 과정을 방해하는, 계획되지 않은, 때로는 상해를 입히거나 재산상의 손상을 초래하는 사상(event)을 의미한다. 사고는 반드시 불안전 행동이나 불안전 상태가 선행되어 야기되며 위험성 구명의 실패나, 현존하는 위험성 제어 시스템내의 부적합으로부터 초래된다. 이동사고의 발생빈도를 추정하는 과정에서 incident를 포함하지 않는 이유는 실제로 자주 발생되는 단순한 slip, trip, fall과 같은 incident는 사소한 것으로 간주되어 보고되지도, 기록되지도 않는 경우가 많기 때문이다. 열차운행 마일 당 발생 사고(accident) 수 외에 이동사고의 발생빈도로서 승객 여정 (passenger journey) 당 사고 수 또는 괘도 마일(track mile)당 사고 수를 사용하기도 한다.

이동사고의 발생빈도 추정에는 영국철도안전시스템국에서 수행한 기반설비 및 장비 고장에 의한 리스크 평가와 마찬가지로 FTA기법을 사용한다. 분류된 잠재사고를 top event로 하고 top event의 원인 전조들을 파악하여 AND나 OR gate를 사용하여 하향식으로 전개한다. 각 원인전조의 발생확률은 사고통계나 전문가 추정에 의해 입력한다.

표 2. RCI에 의한 잠재사고 분류 중 이동사고 유형

이동 사고		
위험분류번호		위험사건 내용
HEM	1	정차후 소개(evacuation)
HEM	2	주행열차로부터 승객 추락
HEM	3	열차외부에 기대어 있다가 승객 타격(struck)
HEM	4	열차 창을 통한 물체에 의한 승객 타격
HEM	5	열차 출입문에 승객 끼임
HEM	6	열차와 플랫포옴 사이에 승객 추락
HEM	7	정거장에서 열차로부터 선로 위로 승객 추락
HEM	8	승객이 플랫포옴으로부터 추락하여 열차에 치임
HEM	9	탑승중 승객 추락/부상
HEM	10	플랫포옴 상에서 물체에 맞음
HEM	11	승객이 정거장내 선로 건널목을 지나다 열차에 치임
HEM	12	일반대중 무단진입자가 정거장내 선로 건널목을 지나다 열차에 치임
HEM	13	열차 과밀
HEM	14	승무원 열차에 치임
HEM	15	주행열차로부터 승무원 추락
HEM	16	탑승중 승무원 추락/부상
HEM	17	열차외부에 기대어 있다가 승무원 타격(struck)
HEM	18	열차 창을 통한 물체에 의한 승무원 타격
HEM	19	작업자 열차에 치임
HEM	20	작업자 비상 물체에 맞음
HEM	21	열차와 플랫포옴 사이에 작업자 추락
HEM	22	정거장에서 열차로부터 선로 위로 승무원/작업자 추락
HEM	23	열차 출입문에 선로작업자 끼임
HEM	24	선로장비/운반차 외부에 기대어 있다가 작업자 타격(struck)
HEM	25	RCI 작동중 성인 무단진입자 타격
HEM	26	RCI 작동중 아동 무단진입자 타격
HEM	27	건널목(level crossing)에서 열차에 일반행인 치임
HEM	28	건널목 보도 (footpath crossing)에서 열차에 일반행인 치임
HEM	29	RCI 작동에 의해 RCI밖의 일반인 타격

(3) 비이동사고

RCI에 의한 잠재사고 중 비이동사고는 RCI로부터의 위험물, 전기, 충격 등에 승객, 직원, 일반 대중이 직접 노출되는 사고들을 분류한다 (표 3). 비이동사고는 일반 산업안전사고와 동일한 유형의 사고가 RCI 시설내에서 발생하는 경우이므로 발생빈도는 크지만 인명 피해는 사고에 관련된 개인에게 국한되므로 손실의 크기는 비교적 작다.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

표 3에서 보는 바와 같이 비이동사고는 실제로 자주 일어나는 사고이므로 사고 통계가 비교적 풍부하다. 따라서 발생빈도와 손실의 크기를 추정하는 과정에서 경험자료가 차지하는 비중이 크다. 물론 사고 통계가 부족한 경우에는 전문가의 판단도 활용한다. 발생빈도를 추정하는 과정에서는 수 십 년간의 조업기간 중에 발생할 수 있는 가능성을 고려한다. 비이동사고의 발생빈도는 열차운행 마일 당 발생 사고수로서 추정한다. 사고는 사상자가 발생한 사고로서 활동의 정상적인 과정을 방해하는, 계획되지 않은, 때로는 상해를 입히거나 재산상의 손상을 초래하는 사상(event)을 의미한다. 비이동사고의 발생빈도를 추정하는 과정에서 incident를 포함하지 않는 이유는 실제로 자주 발생되는 사망이나 부상이 수반되지 않는 단순한 산업안전사고와 같은 incident는 사소한 것으로 간주되어 보고되지도, 기록되지도 않는 경우가 많기 때문이다.

열차운행 마일 당 발생 사고수 외에 비이동사고의 발생빈도로서 승객 여정(passenger journey) 당 사고 수 또는 괘도 마일(track mile)당 사고 수를 사용하기도 한다.

2.2.4 안전시설 투자를 위한 비용편익 분석에 사용된 자료

철도시스템에 대한 리스크 평가의 궁극적 목적 중의 하나는 안전성 향상을 위한 투자의 타당성을 평가하는 것이다. 영국철도안전그룹에서는 비용편익분석에 사용하기 위해 다음과 같은 손실환산 공식을 개발하였다.

표 3. RCI에 의한 잠재사고 분류 중 비이동사고 유형

비이동 사고		
HEN	1	노변 화재(정거장 밖)
HEN	2	노변화재(정거장 내)
HEN	3	정거장내 화재
HEN	4	노변 폭발
HEN	5	정거장내 폭발
HEN	6	위험물질 누출에 의한 승객 폭발
HEN	7	정거장 내 위험물질에 의한 승객 폭발
HEN	8	정거장 내 승객 전기 아크에 노출
HEN	9	정거장 내 승객 전기 감전(OHL)
HEN	10	정거장 내 승객 전기 감전(conductor rail)
HEN	11	정거장 내 승객 전기 감전(non-traction supply)
HEN	12	정거장 내 승객 연기 유독가스에 노출
HEN	13	정거장에서 열차로부터 선로 위로 승객 추락(열차 부재시)
HEN	14	승객이 미끄러짐, 넘어짐, 추락
HEN	15	정거장내 고가로부터 승객 추락
HEN	16	정거장에서 소개 중 승객 추락
HEN	17	정거장내 과밀에 의한 승객 압착
HEN	18	위험물질에 승무원 노출
HEN	19	정거장 내 승무원 전기 감전(conductor rail)
HEN	20	정거장 내 승무원 전기 감전(overhead line)
HEN	21	구조물붕괴 또는 큰 물체에 의한 작업자 타격
HEN	22	기계에 작업자 끼임
HEN	23	플랫포옴 상에서 작업자가 끼이거나 압착되거나 맞음
HEN	24	작업자가 미끄러짐, 넘어짐, 추락(<2m)
HEN	25	작업자가 미끄러짐, 넘어짐, 추락(>2m)
HEN	26	열차 이외의 탈것에 작업자 치임
HEN	27	작업자 화상
HEN	28	물못에 작업자 노출
HEN	29	위험물질에 작업자 노출
HEN	30	작업자 감전 (conductor rail과 접촉)
HEN	31	작업자 감전 (OHL과 접촉)
HEN	32	작업자 감전 (non-traction supply와 접촉)
HEN	33	작업자 질식 또는 물에 빠짐
HEN	34	폭발에 작업자 노출
HEN	35	RCI 상에서 작업자가 교통사고 당함
HEN	36	RCI내에서 성인무단진입자 추락
HEN	37	성인무단진입자 전기 감전 (OHL과 접촉)
HEN	38	성인무단진입자 전기 감전 (conductor rail과 접촉)
HEN	39	성인무단진입자 전기 감전 (non-traction supply와 접촉)
HEN	40	RCI내에서 아동무단진입자 추락
HEN	41	아동무단진입자 전기 감전 (OHL과 접촉)
HEN	42	아동무단진입자 전기 감전 (conductor rail과 접촉)
HEN	43	아동무단진입자 전기 감전 (non-traction supply와 접촉)
HEN	44	건널목설비에 일반인 피격 또는 걸림
HEN	45	RCI밖에서 일반인 추락
HEN	46	건널목 (level crossing)에서 일반인 미끄러짐, 넘어짐, 추락
HEN	47	건널목 보도(footpath crossing)에서 일반인 미끄러짐, 넘어짐, 추락
HEN	48	RCI 상 화재에 일반인 노출
HEN	49	RCI 상 폭발에 일반인 노출
HEN	50	전기아크에 일반인 노출
HEN	51	일반인 전기 감전 (OHL과 접촉)
HEN	52	일반인 전기 감전 (conductor rail과 접촉)
HEN	53	일반인 전기 감전 (RCI 내 non-traction supply와 접촉)
HEN	54	RCI 상 위험물질에 일반인 노출

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

이와 같은 손실 환산 공식은 보험회사 등에서 동종의 재해사망에 대해 지불하는 비용을 기반으로 하고 각종 손해배상 판례를 참조하여 개발하는 것이 일반적이다 (Railtrack PLC Railway Safety Case, 1999; Railway Group Safety Plan, 2001).

a) 사망자 일인을 막는 가치 (value of Preventing a Fatality; VPF) = 1.15 백만 파운드/ 1 equivalent fatality
b) 일반대중 그룹에 미치는 리스크가 비용편익의 한계에 있거나 다중사상자를 발생시킬 가능성이 있는 경우의 VPF=3.22 백만 파운드/ 1 equivalent fatality
c) 상기 자료는 단지 의사결정 지침으로 사용되어야 하며 투자나 비용지출 평가시에는 조직의 목표를 반영한 다른 요인을 고려해야 한다.

2.3 런던지하철 안전품질환경국에서 수행한 지하철기반시설에 의한 잠재사고 위험성 평가

런던지하철 안전품질환경국(Safety Quality and Environmental Depart-ment of London Underground)에서는 지하철 기반시설 중 적절한 리스크 제어 조처가 취해져야 할 곳을 파악하고 추가적 제어조처가 합리적으로 실행 가능한 것인지를 파악하기 위하여 런던지하철에 대한 정량적 리스크 평가모델 (London Underground Quantified Risk Assessment Model; LUL QRA)을 개발하였다(London Underground Limited Quantified Risk Assessment, 2001). 이 모델은 지하철 기반시설로부터 발생 가능한 잠재사고를 16가지로 크게 분류하고 각각에 대해 원인전조를 파악하여 각 원인전조의 발생빈도와 손실의 크기를 각각 FTA와 ETA기법을 통해 추정하고 결과 리스크를 리스크프로필 등을 통해 발표하는 과정을 채택했다. 따라서 리스크 평가기법의 근본 구조는 영국 철도 시스템 안전국에서 도입한 기반설비시스템 및 장비에 대한 리스크 평가 모형이나 영국철도안전그룹에서 개발하여 RCI에 의한 잠재사고 위험성 평가에 적용한 리스크 평가기법과 거의 동일하다.

LUL QRA에서 비용편익분석을 위한 사망자 환산공식은 영국철도안전그룹이 제시하는 사망자 일인을 막는 가치 (value of Preventing a Fatality; VPF = 1.15 백만 파운드/ 1 equivalent fatality)와는 약간 다르다. LUL QRA에서 사망자 일인을 피하기 위해 지불용의가 있는 가치는 1.4 백만 파운드/ 1 equivalent fatality로서 런던지하철 이사회와 환경교통성의 승인을 받았다.

사망자 일인을 피하기 위해 지불 용의가 있는 가치 이외에도 중상자 일인을 피하기 위해 지불용의가 있는 가치는 1.4백만 파운드 X 0.1, 경상자 일인을 피하기 위해 지불용의가 있는 가치(willingness to pay value)는 1.4백만 파운드 X 0.01로 설정하였다.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

3. 결 론

영국철도기반설비관련 잠재사고 위험성 평가 체계를 비교한 결과 국내 철도 위험 평가 체계를 선진화하고 정량적 위험성 평가방법을 도입하기 위해서는 다음과 같은 과제들이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

(1) 현행 철도시스템에 의한 사고 분류체계(철도청, 2002; 철도청, 2001; 철도청, 1989)는 열차사고, 건널목사고, 운전장애관련사고들이 여객사상사고, 공중사상사고, 직무사상사고와 중복 분류될 수 있다. 이와 같은 중복분류는 리스크 평가 결과를 부정확하게 하고 중복 추정에 따른 낭비가 따른다. 따라서 중복분류를 피하고 리스크 크기에 따른 철도관련 잠재사고 대분류 체계를 재구성하여야 할 것이다.

(2) 현형 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 리스크 평가결과가 정확해질 것이다.

(3) 특정 잠재사고에 대한 리스크 추정을 위해서는 사고의 원인전조 파악, 결과전조(consequence precursor) 파악 및 이들이 발생빈도와 손실의 크기에 영향을 미치는 구조를 파악하여야 한다. 즉 사고의 손실과 발생빈도 파악을 위한 사고 모델을 개발해야 한다. 이 과정에는 리스크평가 전문가, 철도 시스템 전문가, 철도운영전문가, 철도사고처리 담당자들이 팀을 형성하여 사고모델 개발을 위한 공동작업이 요구된다. 철도사고 리스크 평가팀은 수 많은 잠재사고 중 분석대상의 우선순위를 결정하고 주기적 회합을 통해 선정된 분석 대상에 대한 정보교환과 사고 모델링 작업을 진행해야 한다.

(4) 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 있다. 특히 영국철도시스템 안전국에서 개발한 기반설비시스템 및 장비에 대한 잠재 위험요소 파악 기법, 영국철도안전그룹에서 수행한 영국 철도 기반설비에 의한 잠재사고에 대한 리스크 평가기법, 런던지하철 안전품질환경국에서 수행한 지하철기반시설에 의한 잠재사고 위험성 평가 기법 등은 별 무리 없이도 국내 실정에 맞게 도입될 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

이동하, 나윤균, 김명수, 리스크 관리규격의 제품안전 경영프로그램에 대한 적용, 신뢰성응용연구, 1권, 2호, pp. 106-120, 2001.

철도청, 2002 년도 철도사고분석, 2002.

철도청, 2001 년도 철도사고사례집, 2001.

철도청, 1989 년도 철도사고사례집, 1989.

Accident consequence modelling, WS Atkins Science & Technology.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

AM3468/R002 Issue 1. 1997.
Infrastructure Risk Modelling Railtrack EE&CS Report Issue 1, RT/S&S/IRM_FTA/31, 1997.
London Underground Limited Quantified Risk Assessment, LUL Issue 1, 2001.
Profile of Safety Risk on Railtrack PLC-controlled infrastructure Issue 1, Report No. SP-RSK-3.1.3.11, 2001.
Railtrack PLC Railway Safety Case. Railtrack RTRSC 23. 5, 1999.
Railway Group Safety Plan, 2001.

저자 소개

◈ 이동하

서울대학교 산업공학과 학사
KAIST 산업공학과 석사, 박사
수원대학교 산업정보공학과 교수
관심분야 : 인간공학, 인간공학의 원자력 분야 응용, 리스크 평가 및 관리

◈ 정광태

고려대학교 산업공학과 학사
KAIST 산업공학과 석사, 박사
한국기술교육대학교 디자인공학과 교수
관심분야 : 인간공학, 산업안전, 제품평가

논문접수일 (Date Received): 2003/01/31
논문게재승인일(Date Accepted): 2003/02/15

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.