

철도종사자의 직무사고 시나리오 개발 및 위험도 평가에 관한 연구

A Study on the Accident Scenarios Analysis and Hazard Analysis for Railway Staffs

박찬우* 왕종배* 조연옥**
Park, Chan-Woo Wang, Jong-Bae Cho, Yun-ok

Abstract

Accident scenarios analysis is a course to understand, analyze, and describe a process of an accident and behavior pattern of the parties to an accident. The method of accident scenarios is that we described patterns represented between accidents and hazardous conditions, and then provide data to prevent the accident. We have carried out scenarios analysis in various fields so far, but it was not taking account of system. In this research, we made a study on technology of accident scenarios analysis using QFD (Quality Function Deployment) to analyze systematically and evaluate quantitatively types of hazards and scenarios of railway accident. And we analyses accident scenarios of a subject of work-related fatality accident to railway employee and conducted risk assessment for different scenarios. Also we defined relation between unsafe events and hazardous conditions caused to work-related fatality accident, and attempted to quantitatively assess work-related fatality accident and the parties to accidents. The results of this research will be used in analyzing for important causes and contributing factors of work-related fatality accidents at the step of risk assessment of railway system, and quantitatively assessing frequency of work-related accidents and risk.

1. 서론

철도 시스템의 위험도(risk) 분석은 사고관련 자료의 분석을 통해 철도사고를 유발할 수 있는 취약요인과 안전위험 요소를 사전에 파악하는 예비위험분석(Preliminary Hazard Analysis, PHA)을 기반으로 하여 사고의 직·간접 원인과 중요 기여요소를 분석하고, 사고위험 발생확률과 사고위험도를 정량적으로 평가하는 기술개발이 요구된다. 특히, 위험도 분석의 초기단계인 예비위험분석 단계에서는 전체적인 관점에서 사고를 분명히 이해하고, 사고의 발생과정과 사고대상자의 행동 패턴을 분석하고, 정의하며, 서술하는 과정이 체계적으로 수행되어야 한다. 철도사고의 이해는 사고의 원인을 조사하고, 사고의 세부 순서를 분석함으로써 수행될 수 있으며, 이는 사고분석방법을 통하여 분석될 수 있다.

일반적으로 널리 알려져 쓰이고 있는 사고분석방법으로 고장위험 및 영향분석(Potential Failure Mode and Effect Analysis)과 결함수분석(Fault Tree Analysis)이 있다. 고장위험 및 영향분석 기법은 예상 가능한 고장 형태에 따른 영향 정도를 추정하여 신뢰성과 안전성을 평가하는

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 수석연구원, 정회원

방법으로 제조물 설계단계에 널리 쓰이고 있다. 결합수분석은 고장을 발생시키는 사건(Event)과 그의 원인과의 인과관계를 논리기호(and, or)를 사용하여 고장확률을 구하는 방법이다. 이밖에도 고장결합위험분석(Fault Hazard Analysis), MORT(Management Oversight and Risk Tree), STEP(sequentially Time Event Plotting), 그리고 SCAT(Systemic Casual Analysis Technique) 등이 있다. 그러나 이러한 위험 분석들은 위험분석의 초기 단계에서 분석자의 주관이 개입되기 쉬우며, 시스템 관점의 체계적 분석에 활용되기 어렵다는 한계가 있다[3,4].

한편, 사고 시나리오를 활용한 사고분석방법은 사고의 원인을 보다 구체적으로 밝히고 사고 유형별로 예방책을 강구할 수 있다는 측면에서 그 활용 정도가 높다. 일찍이 Drury[2]는 소비자 제품의 사고분석을 위해 인간공학적 기법을 활용하여 위험 유형(hazard patterns)과 사고 시나리오를 분석하였다. 그는 위험 유형별로 사고를 당하게 되는 사용자의 환경과 행위, 그리고 해당 제품의 특성에 따른 사고 유형을 분석하였다. 이러한 사고 시나리오 분석은 훗날 체계적 사고 시나리오 분석기법(Systemic Accident Scenario Analysis, SASA)을 개발하는데 기반을 제공하였다[3]. 또한 작업장 안전사고에 대한 연구로 작업자의 행위에 중점을 둔 사고 시나리오 분석기법이 연구되었다.

사고 시나리오 분석기법은 자료 분석, 그룹 및 개인 인터뷰를 통해 사고의 발생과정과 사고 대상자의 행동패턴을 이해하고, 분석하고, 서술하는 과정을 나타낸다. 사고 시나리오는 행동 데이터, 사고 당시의 환경특징, 사고원인을 이해함으로써 묘사될 수 있다. 사고 시나리오 분석방법은 사고와 위험조건 사이의 패턴을 묘사하여, 사고예방을 위한 자료를 제공해 줄 수 있다. 지금까지 다양한 분야에서 철도사고의 시나리오 분석을 수행하였지만, 시스템 관점에서 체계화된 분석방법이 제공되지 않고 있다. 사고분석은 사고 조사를 통한 사고의 진상을 밝히기 위한 수단이기도 하지만, 사고 원인을 찾아 사고를 예방하는 것이 주요한 목적이다. 그러므로 위험요인으로 인한 사고를 철저히 분석하여 그 결과를 사고예방에 반영하도록 해야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 철도사고의 위험 유형과 사고 시나리오를 체계적으로 분석하고, 정량적으로 평가할 수 있도록 품질기능전개(Quality Function Deployment, QFD)기법을 이용한 사고 시나리오 분석기법에 관한 연구를 수행하였으며, 이를 기반으로 철도종사자의 직무사상사고를 대상으로 사고 시나리오 분석을 수행하였고, 각 시나리오별 위험도 평가를 수행하고자 하였다. 또한 본 연구에서는 철도종사자의 직무사상사고를 야기하는 불안전사건과 위험조건사이의 관계를 정의하고, 직무사상사고와 사고대상자의 행동 패턴을 정량적으로 평가하고자 하였다. 본 연구의 결과는 철도 시스템의 위험도 평가단계에서 체계적으로 직무사상사고의 직·간접 원인과 중요 기여요소를 분석하고, 직무사고 발생확률과 사고 위험도를 정량적으로 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 예비위험분석(Preliminary Hazard Analysis: PHA) 및 품질기능전개(Quality Function Deployment, QFD)

2.1. 위험도(risk) 평가 프로세스

현재 제안되고 있는 많은 국제안전규격들의 첫 번째 특징은 위험도 평가(risk assessment)에 토대를 한 안전성 입증에 있다. ISO/IEC 가이드 51에 규정된 안전의 기본 개념은 위험도 평가를 바탕으로 하고 있다[5]. 그림1은 가이드51에 표시된 안전성 평가의 순서를 나타낸다. 설비 혹은 시스템은 의도된 사용방법 외에 합리적으로 예견 가능한 오류사용을 배려하여 위험원(hazard)을 판별하고, 위험도의 크기를 어렵잡아 그 위험성이 허용 가능한지의 여부를 평가하여 만약 허용가능하지 않으면 위험성 저감 대책을 실시하여야 한다. 또한 충분히 허용 가능한 위험도 수준일 때를 안전하다고 정의한다[5].

철도사고를 유발할 수 있는 취약요인과 안전 위협요소를 사전에 파악하기 위하여 예비위험 분석이 선행된다. 위험도 분석의 시작으로 상세 분석의 대상을 정의하는 예비위험분석단계에서는 전체적인 관점에서 사고를 분명히 이해하고, 사고 프로세스와 사고대상자의 행동 패턴을 정의하며, 분석하고, 서술하는 과정이 체계적으로 수행되어야 한다. 철도사고를 이해하는 필요조건은 사고의 원인을 조사하고, 사고의 세부 순서를 분석함으로써 수행될 수 있으며, 이것은 사고를 야기하는 사건의 상세한 순서를 분석함으로써 수행될 수 있으며, 이는 사고 시나리오 분석 기법을 통하여 분석될 수 있다.

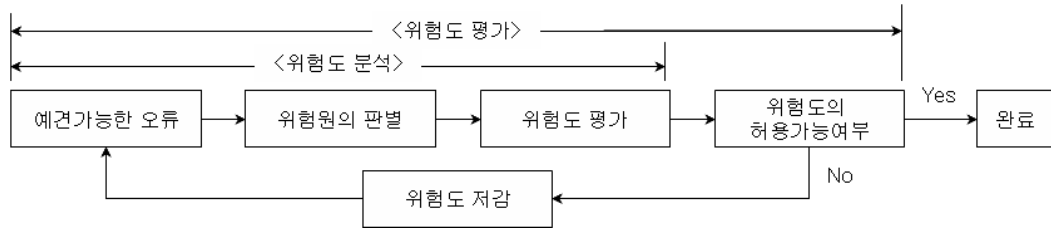


그림1. 위험도 평가 절차

2.2. 예비위험분석(Preliminary Hazard Analysis: PHA)

예비위험분석은 시스템 위험분석의 초기단계에 핵심 안전위험 부분을 확인하고, 위험조건 초기 평가와 필요한 위험조건 관리 및 후속 조치를 판단하기 위하여 수행하는 것으로서, 예비위험분석 절차 및 방법은 그림2와 같다[5].

입력자료	<ul style="list-style-type: none"> · 철도시스템에 대하여 일반적으로 고려되는 가능한 사건들의 리스트 · 시스템 연구의 경계 규정 · 시스템 운영 및 유지보수 단계의 정의 · 위험조건 심각도 수준(gravity) 정의 · 시스템에 대한 설명 <ul style="list-style-type: none"> - 시스템의 기능 흐름도(Functional Flow Diagram) - 기존 시스템에 대한 제품분해구조(Product Breakdown Structure: PBS)
↓	
예비위험 분석	<ol style="list-style-type: none"> ① 철도시스템에 대하여 일반적으로 고려되는 가능한 사건들 중에서 하나의 잠재적 사건을 선택 ② 수명주기에 따른 잠재적 사건의 발생 가능성 조사 ③ 잠재적 사고를 일으키는 모든 불안전 사건의 규정 ④ 불안전 사건의 기술 ⑤ 각 불안전 사건과 관련된 영향의 규정 ⑥ 각 불안전 사건과 일치하는 위험수준의 평가 ⑦ 안전기준의 정의 <ul style="list-style-type: none"> - 각 불안전 사건을 제거하거나, 최소화하거나 또는 통제하기 위하여 수행되어야 하는 대책에 관한 제안 ⑧ 안전대책의 수행 후에 기대되는 빈도 수준의 평가
↓	
출력자료	<ul style="list-style-type: none"> · 불안전 사건들의 리스트와 관련된 위험조건 심각도 수준과 발생빈도 · 잠재적으로 위험한 요소들의 리스트 · 각 위험요소에 대한 안전기준의 정의

그림2. 예비위험분석 단계 및 절차

예비위험분석에서 위험조건의 확인과 평가는 위험조건의 중요성, 위험조건 확률 및 운영 제약조건을 고려하여 이루어지며, 받아들여질 수 있는 수준까지 관련된 위험을 줄이거나 위험조건을 제거하기 위하여 안전대책 및 대안들이 포함될 수 있다. 위험조건 및 불안전사건은 표1 같은 요소를 고려하여야 한다.

표1. 위험조건 및 불안전사건

위험조건	불안전 사건요소
<ul style="list-style-type: none"> · 철도 시스템 수명 주기 및 기술 특성상의 제반 위험요소 · 시스템 구성요소 중 안전과 관련된 인터페이스 · 운영환경을 포함한 환경적 제약조건 · 운영, 검사, 보전, 진단, 위급사항 절차 · 설비, 보조 장치 등 · 안전에 관련된 장치, 안전보호대, 가능한 대안 접근 방법 · 시스템, 보조시스템, 소프트웨어의 오류 	<ul style="list-style-type: none"> · 설비의 기능장애: 기능 없음, 기능퇴화, 시기를 놓친 기능수행위험 요소 · 설비와 관련된 안전: 연동, 시스템 중복, 하드웨어 혹은 소프트웨어 실패 · 연료, 화약, 폭발물, 유독성 물질, 압력 시스템 등의 위험요소 · 환경적 제약: 진동, 극한의 온도, 유독성 물질 · 운영과 보전절차: 인간의 오류 등

2.3. 품질기능전개(Quality Function Deployment, QFD)

품질기능전개는 신제품 개념 정립, 부품 계획, 공정 계획 그리고 생산계획까지 모든 단계를 통해 고객의 요구가 최종 상품(또는 서비스)에 충실히 반영되도록 하여 고객의 만족도를 극대화하는데 초점을 맞추고 있는 종합적 품질경영(Total Quality Management : TQM)의 한 기법이다. 품질기능전개의 기본 개념은 고객의 요구사항을 우선 제품의 설계특성으로 변환하고 이를 다시 부품특성, 공정특성, 그리고 결국 생산을 위한 구체적 사양으로까지 변환하는 것이다. 품질기능전개는 설계단계에서의 개념적 지도라 할 수 있는 그림3과 같이 7개의 요소로 구성된 품질주택(House of Quality, HOQ)을 통해 이루어진다. 지면관계상 자세한 설명은 생략하며, 품질기능전개의 상세 설명은 참고문헌[5,6]을 참고하기 바란다.

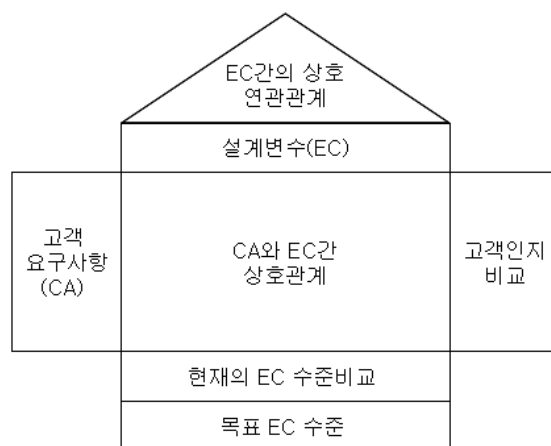


그림3. 품질주택(House of Quality, HOQ)

3. 품질기능전개 기법을 이용한 철도사고 시나리오 개발

본 연구에서 개발된 철도사고 시나리오의 개발 모형은 품질기능전개의 품질주택을 근간으로 개발되었으며, 품질주택의 고객요구사항(CA)과 설계변수(EC)는 각각 철도사고를 야기하는 불안전사건과 위험조건으로 대치하여 철도사고 시나리오를 구성하게 되어 있다. 품질주택의 나머지 요소는 본 모형에서 제외된다. 본 모형은 다음과 같은 6개의 단계를 거치게 된다.

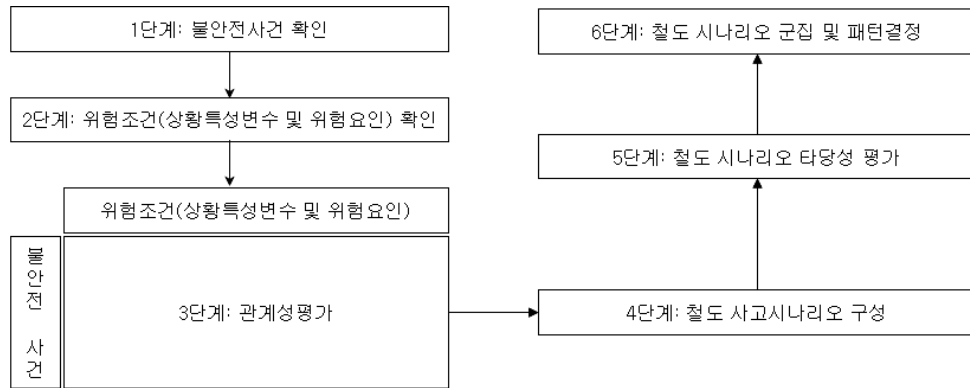


그림4. 품질기능전개 기법을 이용한 철도사고 시나리오 개발 절차

· 1단계(불안전사건 확인)

본 단계는 철도사고를 정의하는 가장 중요한 단계로, 국내외 철도사고 자료의 분석을 통해 수행되며, 예비위험분석의 불안전 사건의 정의방법, FMEA 및 FTA 방법의 사용하여 충돌, 탈선, 폭발, 질식, 화상/열상, 추락, 감진, 중독, 착상 등의 불안전 사건을 정의할 수 있다. 불안전 사건이 정의되면, 불안전 사건별로 이 사건의 발생빈도를 계산하고, 심각도(사상자, 재산피해, 열차지연시간 등)를 계산하여, 이 두 값의 곱으로 위험도를 계산하고, 이를 중요도로 표시한다. 여기서, 위험도는 세부 위험조건 별로 위험도가 아닌 사고결과 위주의 위험도를 뜻하므로 단순한 철도사고 자료의 집계에 의해 수행될 수 있으며, 심각도의 계산에서 사상자, 재산피해, 열차지연시간 등을 모두 고려한 혼합 계산방법은 분석자의 가중치를 반영할 수 있을 것이다.

· 2단계(위험조건 확인)

위험조건은 철도사고를 일으킨 상황의 사고대상자, 행위, 환경, 사고원인 변수를 의미하며, 각 변수별로 세부적으로 결정될 수 있다. 예를 들어, 사용자 변수는 나이, 성별, 상해부위, 그리고 상해 타입 등으로 구분될 수 있다.

		위험조건											
		사고대상자 특징			행위 특징			환경 특징			사고 원인		
불완전 사건	중요도	1	2	●●	1	2	●●	1	2	●●	1	2	●●
불완전 사건1													
불완전 사건2													
.													
.													
불완전 사건 N													

관계 표시

●● : 강 관계 (5점)

○ : 중 관계 (3점)

● : 약 관계 (1점)

그림5. 철도사고 시나리오 분석 테이블

·3단계(관계성 평가)

불안전사건요소와 상황특성 변수간의 관계는 철도사고 발생빈도와 사고심각도 분석을 통해, 이 두 값의 곱인 위험도로 정의되며, 예를 들어 위험도가 높으면 “5점”, 중간은 “3점”, 낮으면 “1점”, 그리고 관계가 없으면 공란으로 처리될 수 있다.

·4단계(시나리오 구성)

그림 5는 앞의 단계가 완성된 후, 관계가 있는 변수들만을 엮어서 가능한 모든 시나리오를 구성할 수 있는 위험 시나리오 분석 테이블을 나타낸다. 예를 들어, 불안전 사건 하나에 위험조건으로 철도사고대상자 변수 5개, 행위변수 4개, 환경변수 3개, 그리고 사고원인변수 3개가 관계를 맺고 있다면, $1 \times 5 \times 4 \times 3 \times 3 = 180$ 개로 구성된다.

·5단계(시나리오 타당성 평가)

구성된 시나리오가 실현 가능성(feasibility)이 있는지 여부를 평가한다. 예를 들어, 사고대상자가 여객인데, 행위유형이 열차수리작업이라면 실현가능성이 없는 것으로 판단하여 해당 시나리오를 제거한다.

·6단계(시나리오 군집 및 패턴결정)

각 시나리오의 가중치 총합을 계산하여, 중요도 및 위험도 순위를 결정하고, 시나리오를 위험 요소별 군집으로 구분한다. 이때 총 빈도치는 '불안전 사건의 중요도' × '각 상황 특성 변수의 관계성'의 합계로 계산된다.

4. 결론

본 연구에서는 위험도 분석의 초기단계인 예비위험분석에서 철도사고의 위험 유형과 사고 시나리오를 체계적으로 분석하고, 정량적으로 평가할 수 있는 품질기능전개(Quality Function Deployment, QFD)기법을 이용한 사고 시나리오 분석기법에 관한 연구를 수행하여, 이를 위한 필요 요건과 개발 체계를 제시하고자 하였다. 제안된 방법은 철도사고를 야기하는 불안전사건과 위험조건사이의 관계를 정의하고, 사고 프로세스와 사고대상자의 행동 패턴을 정량적으로 평가한다. 따라서 본 연구에서 제안된 방법은 향후 예비위험분석 및 위험도 평가에서 체계적으로 철도사고의 직·간접 원인과 중요 기여요소를 분석하고, 사고 발생확률과 사고 위험도를 정량적으로 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Cohen, A.(1995), “Quality Function Deployment-How to make QFD work for you”, Addison-Wesley Publishing Company Inc.
2. Dury C.G.(1983), “Human factors in consumer product accident investigation”, Human Factors, Vol.25, No.3, pp.329-342.
3. Lee D.H.(2000), “A systematic approach to accident scenario analysis for designing safer products: child nursery equipment case studies”, Thesis for degree of doctor of philosophy, Kyunghee University, Seoul Korea
4. 김사길(2003), “사고비용을 고려한 체계적 사고시나리오 분석모델 개발”, 석사학위논문, 경희대학교
5. 왕종배 외(2004), “철도시스템 안전요건 관리체계 구축 기술개발”, 한국철도기술연구원
6. 전용호, 유일근 외(1996), “QFD를 이용한 항공서비스 불만처리흐름개선”, 품질경영학회지 제24권 제4호