

반 정량적 리스크 저감 요소를 고려한 철도 승강장 스크린 도어시스템의 안전 무결성 수준 할당

송기태 · 이성일*

한국교통대학교 안전공학과

(2016. 6. 22. 접수 / 2016. 8. 1. 수정 / 2016. 8. 5. 채택)

Allocation of Safety Integrity Level for Railway Platform Screen Door System considering Semi-Quantitative Risk Reduction Factor

Ki Tae Song · Sung Ill Lee*

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation

(Received June 22, 2016 / Revised August 1, 2016 / Accepted August 5, 2016)

Abstract : There exists required safety integrity level (SIL) to assure safety in accordance with international standards for every electrical / electronics / control equipment or systems with safety related functions. The SIL is allocated from lowest level (level 0) to highest level (level 4). In order to guarantee certain safety level that is internationally acceptable, application of methodology for SIL allocation and demonstration based on related international standards is required. However, the theoretical and practical study for safety integrity level is barely under way in the domestic railway industry. This research studied not only the global process of SIL allocation to guarantee safety in accordance with international standards for safety related equipment and system, but the quantitative methodology based on international standard and the semi-quantitative methodology as alternative way for SIL allocation. Specifically, the systematic SIL allocation for platform screen door system of railway is studied applying the semi-quantitative methodology in order to save much time and effort compared to quantitative method.

Key Words : safety integrity level, railway, platform screen door, safety integrity allocation, tolerable hazard rate, tolerable individual risk, individual risk of fatality

1. 서론

국제적으로 수용 가능한 시스템의 안전성을 보증하기 위해서는 관련 규격에 근거하여 해당 시스템의 특성에 적합한 수준의 안전 무결성 수준(Safety Integrity Level)의 할당(Allocation)을 위한 방법론의 적용이 요구된다. 하지만, 현재 국내 철도산업분야에서는 이러한 안전성 무결성 수준과 관련한 이론적 및 실무적 연구가 많이 진행되고 있지 않은 상황이다.

본 연구에서는 안전성과 관련된 장치 또는 시스템과 관련하여 국제적인 규격에 따라 안전성을 보증하기 위하여 요구되고 있는 안전 무결성 수준에 대한 기본적인 할당 절차를 간략히 설명하고 국제 규격에 근거한 여러 방법론 중 하나인 정량적 방법론과 해당 방법론을 기반으로 반 정량적 리스크 저감 요소를 고려하여

할당 수행 시 소요되는 많은 시간과 노력을 줄이기 위한 효율적 할당 방법론에 대하여 연구하였다. 이를 통한 실제 적용 결과를 검토하기 위하여 철도 승강장 스크린 도어시스템의 기능 중 주요 안전성 관련 기능을 선정하여 기존 관련 규격에 근거한 정량적 할당 방법론과 본 연구에서 제안하는 반 정량적 리스크 저감 요소를 고려한 안전 무결성 수준 할당 방법론을 적용하여 분석을 수행하고 그 결과를 비교 검토하였다.

2. 안전 무결성 수준 할당

본 절에서는 철도시스템 적용에 관련된 국제규격^{2,3,4}을 참조하여 안전 무결성 할당에 대한 일반적 절차, 리스크 분석 절차 및 정량적 할당 방법론(개별 리스크 및 허용 위험요인 발생률(Tolerable Hazard Rate, THR)산출)

* Corresponding Author : Sung Ill Lee, Tel : +82-43-841-5334, E-mail : silee@ut.ac.kr

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, 50, Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk 27469, Korea

에 대한 설명과 국제 규격에서 제시하는 정량적 안전 무결성 할당방법론과 정량적 방법론 적용시 소요되는 시간과 노력을 줄이기 위한 새로운 방법론으로서 반 정량적 리스크 저감요소를 고려한 안전 무결성 할당 방법론에 대하여 다음의 하부 절에서 기술한다.

2.1 안전 무결성 수준 할당을 위한 일반적 절차

국제규격에 근거하여 원칙적인 철도시스템의 안전 무결성 수준 할당을 위해서는 기본적으로 철도시스템을 수용하고 운영할 철도시스템 발주기관 또는 운영기관(Railway authority)으로부터의 초기 리스크 분석에 기반한 상위수준의 안전성 요구사항(또는 목표)가 제시되어야 하며, 제시된 요구사항에 부합하도록 시스템을 개발하고 제공해야 할 책임이 있는 시스템제공사(Supplier)에 의한 하부 수준의 요구사항 할당 및 안전성 보증 활동이 필수적인 요소이다. 또한, 국제기준, 법규/규정, 시스템 특성 등을 고려하여 안전성 요구사항 및 보증 활동에 대한 적합성을 검토하고 평가하기 위한 철도 안전 승인기관(Railway safety authority) 또는 독립 안전성 평가(Independent Safety Assessment)의 역할이 요구된다.^{2,3)} 각 주요 조직의 책임 및 역할에 따른 철도시스템 안전 무결성 할당 절차는 아래의 Fig. 1과 같다.

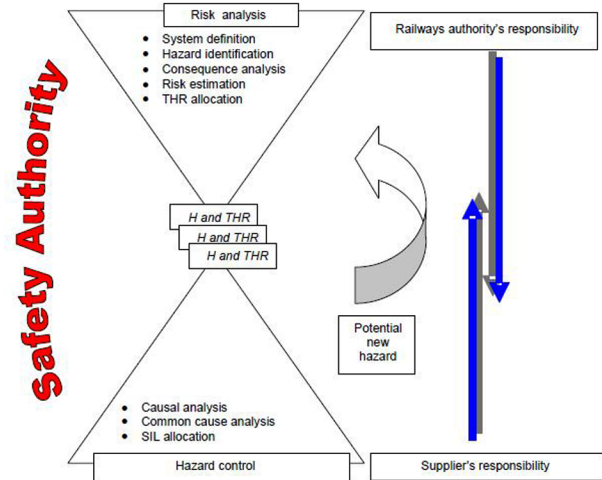


Fig. 1. Overview of global process for SIL allocation³⁾.

상기의 Fig. 1에 기반한 철도시스템의 안전 무결성 수준 할당 절차를 요약하면 아래와 같다.

- 시스템의 운영환경, 주요 기능, 인터페이스 등을 고려한 시스템 정의
- 시스템 운영과 관련된 상위수준의 주요 위험요인 식별

- 식별된 주요 위험요인으로부터 발생 가능한 결과를 고려한 허용 가능 위험요인 발생률 결정
- 상위수준의 위험요인과 관련된 원인분석과 시스템 구조를 고려한 안전성 관련 하부시스템 또는 기능 정의
- 정의된 안전성 하부시스템 및 기능에 대한 허용 가능 위험요인 발생률 및 안전 무결성 수준 할당

위에서 정의된 절차의 적용을 위한 각 활동 별 주요 입력데이터와 출력물은 아래의 Fig. 2와 같이 정의할 수 있다.

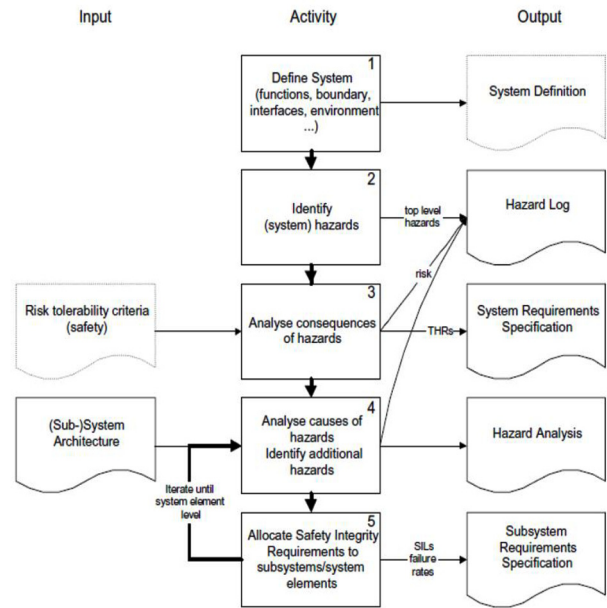


Fig. 2. Overview of SIL allocation process⁴⁾.

위의 Fig. 2에 정의된 절차 중 1에서 3단계(System definition, Hazard Identification, Consequence Analysis)는 철도 운영기관(Railway authority)의 책임 하에 수행되는 상위 시스템 수준에서의 안전 무결성 수준 할당절차로 구분되며, 4에서 5단계의 경우는 시스템 제공사(Supplier)의 책임 하에 수행되는 하부시스템(또는 기능) 수준에서의 안전 무결성 수준 할당절차를 의미한다.

2.2 국제 규격에 근거한 정량적 할당 방법론

Fig. 2에서 정의된 절차를 기반으로 검토할 때 정량적 안전 무결성 수준의 할당을 위하여 가장 주요한 활동은 시스템 운영 특성을 고려한 리스크 분석으로 판단 할 수 있다. 상위 시스템 수준에서 수행되는 안전 무결성 수준 할당을 위하여 적용되는 리스크 분석 절차는 아래의 Fig. 3과 같다.

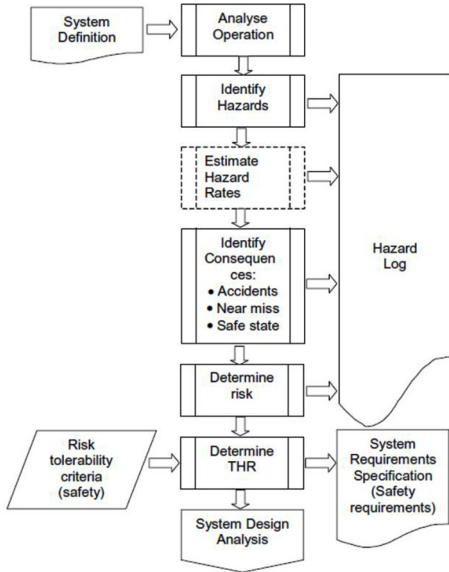


Fig. 3. Risk analysis process for system level⁴⁾.

상기의 리스크 분석 절차에 기반한 정량적 방법을 통한 안전 무결성 수준 할당을 위해서는 시스템의 운영환경을 고려한 주요 위험원의 식별, 체계적인 결과 분석 및 손실 분석이 수행되어야 한다.

정량적인 방법론을 통한 안전 무결성 수준을 할당하기 위해서 가장 주요한 활동은 허용 가능 위험요인 발생률(THR)을 정의하는 것이다. 이는 대상 위험요인에 대한 허용 가능 위험요인 발생률을 정의함으로써 국제규격에 근거하여 허용 가능 위험요인 발생률에 따라 대응되는 안전 무결성 수준을 할당가능하기 때문이다. 국제규격에 근거한 허용 가능 위험요인 발생률에 따른 안전 무결성 수준은 아래의 Table 1과 같다.

Table 1. THR and SIL table³⁾

Tolerable hazard rate THR per hour and per function	Safety integrity level
$10^9 \leq \text{THR} < 10^8$	4
$10^8 \leq \text{THR} < 10^7$	3
$10^7 \leq \text{THR} < 10^6$	2
$10^6 \leq \text{THR} < 10^5$	1

정량적으로 허용 가능 위험요인 발생률을 산출하기 위해서는 우선적으로 개별 리스크(Individual Risk) 산출을 위한 수식을 정의하고, 이를 통해 사전에 정의된 허용 가능 개별 리스크(Tolerable Individual Risk, TIR)를 기준으로 요구되는 THR을 정의할 수 있다.

“PD CLC/TR, 50451”에 근거하여 개별 사상 리스크(Individual Risk of Fatality, IRF)는 아래의 수식과 같이

정의 된다.

$$\begin{aligned}
 IRF &= \sum_{\text{all hazards } H_j} N_i \left[(HR_j \times D_j + HR_j \times E_{ij}) \sum_{\text{accidents } A_k} C_j^k \times F_i^k \right] \\
 &= \sum_{\text{all hazards } H_j} N_i \left[HR_j (D_j + E_{ij}) \sum_{\text{accidents } A_k} C_j^k \times F_i^k \right]
 \end{aligned}$$

여기서, N_i : 연간 또는 시간당 이용 횟수

HR_j : 위험요인 발생률

D_j : 위험요인 지속시간

E_{ij} : 위험요인 노출시간

C_j^k : 위험요인으로 인한 사고의 발생확률

F_i^k : 사고에 의한 사망 확률

상기 정의된 수식에 근거하여 TIR을 기준으로 THR 산출을 위해서는 아래의 수식을 적용할 수 있다.

$$TIR \geq \sum_{\text{all hazards } H_j} N_i \left[THR_j (D_j + E_{ij}) \sum_{\text{accidents } A_k} C_j^k \times F_i^k \right]$$

2.3 반 정량적 리스크 저감 요소를 고려한 할당 방법론

2.2절에서 설명한 “PD CLC/TR, 50451”에 근거한 정량적 할당 방법론을 적용하기 위해서는 위험요인 노출 시간, 지속시간, 위험요인으로 인한 사고 발생 확률이 정의되어야 한다. 따라서 사전에 시스템 운영 조건이 구체적으로 정의되고 이러한 운영 조건을 고려한 사고 발생 시나리오에 의해 결과 분석이 수행되어야 한다. 또한 결과 분석 시 각각의 사건 발생 확률이 분석자의 경험과 지식에 기반 하여 논리적으로 가정되어야 한다.

하지만, 현실적으로 철도 시스템 개발 및 적용 시의 초기 단계에서 이러한 운영 조건 및 여러 가정 사항들이 사전에 정확하고 구체적으로 정의되기 어려우며, 적용을 한다 하더라도 신뢰성 있는 할당 결과를 얻기 위하여 정량적 분석 수행 경험이 있는 전문가와 많은 객관적 데이터가 필요하며 많은 시간과 노력으로 인한 비용 소모가 발생할 수 있다.

상기에서 기술한 국제 규격에 따른 정량적 할당 방법론의 비효율성을 줄이고 할당 방법론 적용 시 소모되는 시간과 노력을 최소화하기 위하여 본 연구에서는 국제규격에서 정의된 정량적 할당 방법론을 기반으로 적용 시 많은 시간과 노력이 요구되는 정량적 주요 리스크 저감 요소에 대하여 반 정량적 기준을 정의하고 이를 적용함으로써 2.3절에서 정의된 정량적 할당 방법론에 비해 초기 개발 단계에서 구체적인 운영 조건 및 관련 데이터 확보가 어렵고 많은 시간과 비용을 투입하기 어려운 상황에서 적용이 용이하고 효율적인 할

당이 가능한 방법론을 제시하고자 한다. 이를 위하여 우선적으로 “PD CLC/TR, 50451⁴⁾”에 근거한 정량적 할당 수식에 근거하여 적용 시 많은 시간과 노력이 요구되는 주요 리스크 저감 요소를 식별하고 해당 요소에 대한 반정량적 적용 기준을 정의한다. 최종적으로 정의된 반정량적 리스크 저감요소를 “PD CLC/TR, 50451⁴⁾”에 근거한 정량적 할당 수식에 적용하여 반정량적 리스크 저감 요소를 적용한 안전 무결성 할당 수식을 정의한다.

2.2절에서 정의된 수식에서 특정하게 정량적으로 정의되어야만 하며 정성적으로 정의되기 어려운 요소는 “연간 또는 시간당 이용 횟수(N_i)”와 “사고에 의한 사망 확률(F^k)”로 정의할 수 있다. 이는 대상 시스템 특성과 발생 가능한 사고 유형에 따라 특정한 값이 정의되어야 하며, 개발 초기 단계에서 수행되는 위험요인 분석 결과에 기반 하여 정의하는데 있어서 많은 시간과 노력이 요구되지는 않는다. 결과적으로, “연간 또는 시간당 이용 횟수(N_i)”와 “사고에 의한 사망 확률(F^k)”을 제외하고 할당 방법론 적용 시 많은 시간과 노력이 요구되는 요소는 “위험요인 지속시간(D_j)”, “위험요인 노출시간(E_{ij})” 및 “위험요인으로 인한 사고의 발생확률(C^k)”의 3가지 항목으로 정의할 수 있다.

위에서 정의한 3가지 리스크 요소에 대한 반정량적 기준을 정의하기 위하여 “IEC61508¹⁾”에서 정의하고 있는 아래의 기본적인 리스크 산출의 개념에 기반 하여 3가지 항목에 대한 반정량적 요소를 재 정의한다.

Risk (R)
= Frequency of accident(F) × Severity of accident(C)

상기의 기본적인 리스크의 개념에서 사고의 발생 빈도를 나타내는 ‘F’는 아래의 하부요소를 포함한다.

- 위험요인 노출 시간 또는 빈도 (Exposure Time or Frequency to Hazard)
- 사고 발생 저감 확률(Accident Probability Reduction)
- 위험요인 발생률 (Hazard Rate)

위에서 정의된 사고 발생 빈도와 관련한 파라미터 중 “위험요인 지속시간(D_j)”, “위험요인 노출시간(E_{ij})” 및 “위험요인으로 인한 사고의 발생확률(C^k)”과 의미상의 연관성을 고려하면 “위험요인 노출 시간 또는 빈도”의 경우 3가지 항목 중 “위험요인 지속시간(D_j)”, “위험요인 노출시간(E_{ij})”과 동일한 의미의 파라미터로 적용 가능하며, 이와 관련하여 사실상의 사고발생 리

스크를 고려하면 위험요인 지속시간이 노출시간 보다 길다고 하더라도 사고의 발생으로 인한 리스크는 노출된 시간에 의해 직접적으로 결정되므로 위험요인 지속시간은 리스크 결정에 직접적인 요소는 아니라고 볼 수 있다. 따라서 “위험요인 지속시간(D_j)”은 “위험요인 노출시간(E_{ij})”으로 통합하여 고려하도록 한다. 또한 “사고 발생 저감 확률”의 경우에는 “위험요인으로 인한 사고의 발생확률(C^k)”에 의미상 대응되는 항목으로 정의할 수 있다.

본 연구에서는 상기 기술된 리스크 파라미터의 수식적 표현을 용이하게 하기 위하여 “위험요인 노출 시간 또는 빈도”와 “사고 발생 저감 확률”에 대해 아래와 같이 재 정의하였다.

- 위험요인 노출 시간 또는 빈도 : EX_{ij}
- 사고 발생 저감 확률: P_{kj}

위에서 정의된 2가지 리스크 저감 요소를 정량적 할당 방법론에 적용하기 위한 반정량적 기준은 아래의 Table 2와 같다.

Table 2. Semi-quantitative criteria for risk parameter

Risk Parameter	Qualitative Description	Quantitative Value
EX _{ij}	Exposure of members of the risk group to hazard is conservatively to be assumed frequent or permanent	1
	Exposure of members of the risk group to hazard can conservatively assumed to be rare, only in exceptional or short time cases	0.1
	Exposure of members of a risk group to hazard is only in very rare cases to be expected (e.g. passengers in emergency situation etc.)	0.01
P _{kj}	There can no additional barrier be conservatively assumed that would reduce the probability of the hazard evolving into an accident	1
	There exists means or circumstances to clearly reduce the probability that a certain hazard evolves into an accident	0.1
	There exist two means or circumstances to clearly reduce independently the probability that a certain hazard evolves into an accident	0.01

상기 표에서 정의된 각 리스크 파라미터의 정성적 분류 기준 별 정량적 적용 값은 리스크 분석에 관련된 국제 규격^{1), 3)}에 근거하여 Table 1에서와 같이 공통적으로 정의하고 있는 리스크 저감 특성(10의 배수 단위로 저감됨)을 고려하여 초기 리스크 상에서 ‘위험요인 노출’과 ‘사고 저감 확률’에 관련된 정성적 분류 기준

에 따라 단계적으로 1을 기준으로 10^{-1} 씩 순차적으로 저감하여 3단계의 분류수준을 통해 10^{-2} 까지 리스크 저감 확률을 정의하였다. 이렇게 정의된 반 정량적 리스크 저감 요소를 2.2절에 정의된 정략적 할당을 위한 수식에 적용하면 아래의 수식과 같이 반 정량적 리스크 저감요소를 적용한 할당 수식을 재 정의할 수 있다.

$$TIR \geq \sum_{all\ hazards\ H_j} N_i [THR_j \times EX_{ij} \times P_j^k \times F_i^k]$$

3. 적용 결과

상기에서 제시한 정량적 할당 방법론과 반 정량적 리스크 저감요소를 고려한 방법론을 적용하여 철도 승강장 스크린도어 시스템을 대상으로 안전 무결성 수준 할당을 수행하고 결과를 검토하였다.

3.1 시스템 개요 및 운영조건

철도 승강장에 적용되는 일반적 스크린 도어 시스템은 주요하게 구동부, 제어반, 센서 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서 적용할 승강장 스크린도어 시스템은 국내 서울 도시철도 지하 승강장에 설치되는 시스템을 대상으로 하며 시스템 운영 조건은 아래와 같이 가정하였다.

- 1일 열차 운행 시간: 20시간
- 열차 운행 시격: 3분
- 승강장에서의 열차 정차시간: 1분
- 승강장 스크린 도어의 승객출입문의 수: 20개
- 1개 스크린도어의 평균 승/하차 승객: 20명

3.2 위험요인 식별(Hazard Identification)

국내 도시철도에서 운영 중인 승강장 스크린도어 시스템의 주요 안전성 기능에 대한 정량적 안전 무결성 수준 할당을 위하여 주요 위험요인을 식별해야 한다. 원칙적으로는 위험요인 식별은 기존 유사시스템의 경험과 지식에 기반한 식별 방법(Emperical hazard identification method)과 신규시스템이나 기존유사시스템에 대한 위험요인 데이터가 충분하지 않은 경우에 적용되는 창조적 위험요인 식별 방법(Creative hazard identification method)이 적용될 수 있다.

본 연구에서는 전자의 방법에 따라 기존의 승강장 스크린도어 시스템의 발생 가능한 여러 위험요인 중 실제 운영상에서 발생되었던 주요 위험요인을 선정하여 정량적 방법론 적용을 통한 안전 무결성 수준을 할당하였다. 본 연구에서의 적용사례 연구를 위하여 선정된 위험요인은 아래와 같다.

Hazard 1: 승강장 스크린도어와 선로 측 사이의 승객 또는 작업자 감지 불가

3.3 결과 분석(Consequence Analysis)

상기에서 정의된 안전 무결성 할당 대상 위험요인으로 인해 발생 가능한 결과를 분석하기 위하여 사건 트리 분석을 수행하였다. 승강장 스크린도어와 선로 측 사이에 존재하는 승객 또는 작업자를 감지하지 못하는 위험요인으로 인해 발생 가능한 결과는 최종적으로 3가지 유형으로 정의할 수 있다. 승강장 스크린 도어와 선로 측 사이의 승객 또는 작업자가 존재함을 감지하지 못할 경우 최악의 상황에서는 열차 진입 또는 출발

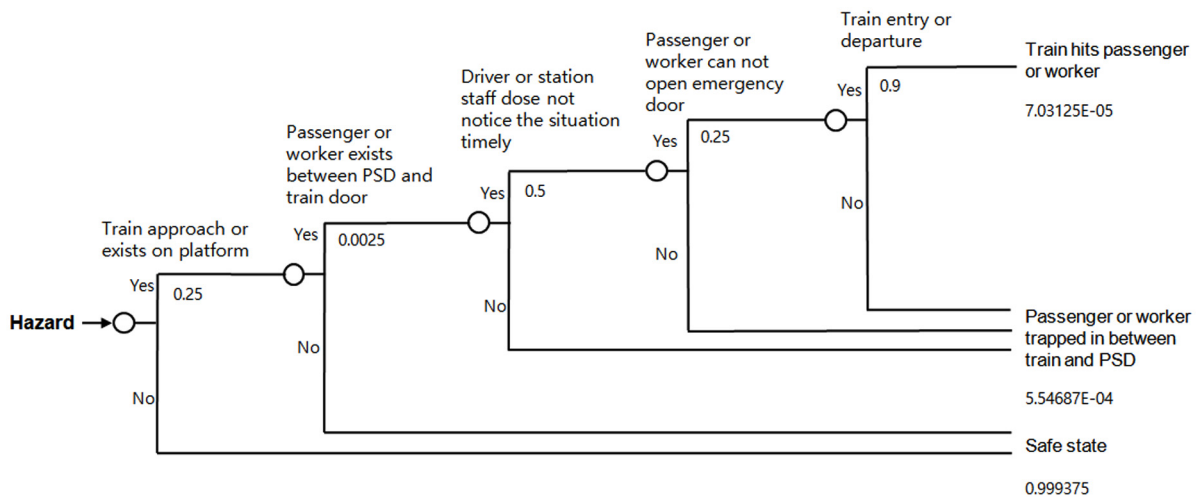


Fig. 4. Event tree analysis for hazard.

함으로 인해 승객 또는 작업자가 사망할 수 있다. 만약, 승객 또는 작업자 존재 상황에서 열차 진입 또는 출발하지 않더라도 열차와 승강장 스크린도어 사이에 끼임으로 인하여 중상을 입을 수 있다. 이와 같은 두 가지유형의 사고가 발생하지 않는 경우 위험요인 발생 후 여러 가지 수단을 통해 승객 또는 작업자가 위험상황으로부터 회피하여 안전상태가 될 것이다.

위에서 설명한 내용에 기반 하여 승강장 스크린도어와 선로 측 사이의 승객 또는 작업자 감지 불가로 인한 결과 분석(Consequence Analysis)을 위해 해당 위험요인으로부터의 사고시나리오를 작성하여 아래의 Fig 4와 같이 사건트리 분석(Event Tree Analysis)을 수행하였다.

상기 결과 분석 시 고려된 시나리오에 따른 각 사건별 확률과 관련한 가정 사항은 3.1에 정의된 운영조건을 고려하여 아래와 같이 적용하였다.

- Train exist on platform: 1일 열차 운행 시간을 20시간(오전 05시 부터 다음날 오전 01시까지), 열차 운행 간격 3분, 승강장에서의 열차 정차 시간을 1분으로 가정하면 승강장에 열차가 존재할 확률은 약 0.25로 정의됨.
- Passenger or worker exists between PSD and train door: 전체 승강장 스크린 도어의 승객출입문의 개수를 총 20개로 정의하고 이 중 보수적으로 1개의 도어에서 승하차하는 인원 20명 중 1명이 PSD와 열차출입문 사이에 존재할 것으로 가정할 때 확률은 0.0025로 정의됨.
- Driver or station staff dose not notice the situation timley: 열차 운전자 또는 역무원에 의해 상황이 인지되지 못할 확률은 1명의 운전자 또는 승강장 역무원이 전체 20개의 승강장 스크린도어 중 10개의 승강장 스크린도어의 상태를 확인할 수 있을 것으로 가정하여 0.5로 정의됨.
- Passenger can not open emergency door: PSD와 열차 출입문사이에 갇힌 상태에서 승객이 비상도어를 조작하여 탈출하지 못할 확률은 실제 승강장에서의 PSD와 차량사이의 간격 및 승객의 비상출입문 조작 능력과 관련되므로 0.25로 가정함.
- Train departure: 이전의 모든 Event의 결과를 고려한 상황에서 추가적인 방호 사건 없이 열차가 출발할 확률은 보수적인 측면에서 매우 높으므로 0.9로 가정함.

3.4 정량적 안전 무결성 할당 결과

상기에서 수행된 시스템 및 운영조건 정의, 대상 위

험요인 식별, 결과 분석 결과를 기반으로 2.2절에서 설명한 개별 위험도(IRF) 및 THR 산출 방법론에 따라 개별 위험도 및 THR을 산출한다. 우선적으로 IRF 산출 후 THR을 산출하기 위해서는 허용 가능 개별 리스크(TIR)을 사전 정의하여야 한다. 본 연구에서는 철도 관련 국제규격(IEC62278)에²⁾ 제시된 TIR(1×10^{-5} fatality/year)을 기준으로 더 보수적인 목표를 설정하기 위하여 안전계수(Safety factor)로서 1×10^1 을 추가 고려하였으며, 최종적으로 ‘ 1×10^{-6} fatality / year’를 TIR로 최종 정의하였다. 해당 값을 연간 8760시간을 기준으로 시간단위(per hour)로 환산하면 ‘ 1.14×10^{-10} fatality / hour’가 된다.

개별 위험도를 산출하기 위하여 2.2절에 정의된 수식에 따라 요구되는 파라미터 중 ‘연간 또는 시간당 이용 횟수(N_i)’와 ‘위험요인 지속시간(D_i)’ 그리고 ‘위험요인 노출시간(E_{ij})’을 아래와 같이 정의하였다.

- N_i : 연간 승객이 PSD를 이용하는 회수는 1000회로 정의.(연 250일간 출/퇴근 시 2번씩 이용하며 1회 환승을 가정함)
- D_i : 위험요인이 발생하여 식별 및 조치되기까지의 시간은 운영 시작 시점부터 위험요인이 존재하여 운영 종료시점까지 식별 및 조치되지 않는 최악의 조건을 고려하여 최대 일 운영시간(20시간)으로 정의.
- E_{ij} : 승객이 승강장에서 위험요인에 노출되는 시간은 승강장에 대기한 상태에서 열차가 진입 후 출발할 때까지의 시간이며 이는 열차운행 시격 및 열차 정차시간을 고려하여 보수적으로 5분으로 정의.

‘위험요인으로 인한 사고의 발생확률(C^k_j)’과 ‘사고에 의한 사망 확률(F^k_i)’은 3.3절의 Consequence Analysis 결과에 따라 아래의 Table 3과 같이 정의하였다. 참고로, 사망확률은 승강장 스크린도어와 선로 측 사이의 승객 또는 작업자 존재상황에서 열차진입 또는 출발로 인한 충격 시 100%의 사망확률을 갖는 것으로 정의하였으며, 열차의 이동(진입 및 출발) 없이 단순히 승강

Table 3. Accident probability parameters

No. (k)	Accident (A_k)	Probability of accident (C^k_j)	Probability of fatality (F^k_i)
1	Train hits passenger or worker	7.03125E-05	1
2	Passenger or worker trapped in between train and PSD	5.54687E-04	0.5

장 스크린도어와 열차사이에 끼임/협착으로 인한 사망 확률은 50%로 정의하였다.

상기에서 정의한 파라미터들을 2.2절에서 제시한 IRF 산출 수식에 적용하여 IRF를 산출하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 IRF &= N_i [HR_1 \times (D_1 + E_{i1}) \sum_{accidents A_k} C_1^k \times F_i^k] \\
 &= 1000 \times HR_1 \times (20 + 0.83) \\
 &\quad \times (7.03125E-05 \times 1 + 5.54687E-04) \\
 &= 7.2417 \times HR_1
 \end{aligned}$$

위의 결과를 기반으로 THR을 산출하기 위해서는 정의된 TIR 보다 IRF가 작거나 동일해야 하므로 3.4절에서 정의된 TIR(1.14×10⁻¹⁰ fatality / hour) 보다 작거나 동일하게 되는 HR₁ 값이 THR이 된다. 이에 따라 상기의 결과를 기반으로 THR을 산출하면 1.58×10⁻¹¹(per hour)가 된다. 산출된 THR을 기준으로 대상 위험요인과 관련한 안전성 관련 기능(승강장 스크린도어와 선로측 사이의 승객 또는 작업자 감지 기능)에 해당하는 안전 무결성 수준은 Level 4이며 이에 따라 승강장 스크린도어 시스템의 ‘승강장 스크린도어와 선로측간 승객 또는 작업자 감지 기능’에 SIL4가 할당 가능함을 확인 할 수 있다.

3.5 반 정량적 리스크 저감 요소를 고려한 할당 결과

정량적 할당 수식을 기반으로 반 정량적 리스크 저감 요소를 적용한 할당 수식은 2.3절에서 제시하였다. 반 정량적 저감요소로 적용되는 파라미터를 제외한 ‘연간 또는 시간당 이용 횟수(N_i)’와 ‘사고에 의한 사망 확률(F^k)’에 대해서는 3.4절에서 가정된 값을 동일하게 적용하였다. 특히 ‘사고에 의한 사망 확률(F^k)’에 대해서는 발생가능 사고 유형 중 가장 최악의 사고와 사망 확률만을 고려하여 보수적인 값을 적용하도록 한다.

반 정량적 리스크 저감요소를 적용하기 위하여 2.3절의 Table 2에 정의된 정성적 분류 기준에 따라 ‘위험요인 노출 시간 또는 빈도(EX_{ij})’와 사고 발생 저감 확률(P^k)’에 대해서는 아래와 같이 정량적 적용 수치를 정의하였다.

- EX_{ij}: 개별 승객이 대상 위험요인에 노출되는 경우는 승강장 스크린도어의 선로 측 장애물 감지 기능 고장 상황에서 승하차를 위한 승강장 스크린도어의 개폐 순간에만 해당되므로 위험요인 노출시간이 매우 짧고 빈도는 매우 드물다고 볼 수 있다. 따라서 해당 리스크 저감 요소에 대한 정

량적 입력 값은 0.1로 정의한다.

- P^k: 개별 승객이 위험요인에 노출된 순간부터 최종 적인 사고 발생까지 사고 발생을 방지 가능한 기관사 또는 역내 안전요원의 조치, 비상도어에 의한 탈출, 비상정지 장치 등의 현실적으로 두 가지 이상의 방호사건(Barrier)들이 존재함을 고려할 수 있다. 따라서 해당 리스크 저감 요소에 대한 정량적 입력 값은 0.01로 정의한다.

상기에서 정의한 파라미터들을 2.3절에서 제시한 반 정량적 리스크 저감 요소의 적용을 통한 할당 수식에 의해 IRF를 산출하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 TIR &\geq \sum_{all\ hazards H_j} N_i [THR_j \times EX_{ij} \times P_j^k \times F_i^k] \\
 &= 1000 \times THR_1 \times 0.1 \times (0.01 \times 1) \\
 &= 1.00 \times THR_1
 \end{aligned}$$

상기의 결과를 기반으로 3.4절에서 적용한 TIR을 고려하여 THR을 산출하면 1.14×10⁻¹⁰(per hour)가 된다. 산출된 THR을 기준으로 대상 위험요인과 관련한 안전성 관련 기능(승강장 스크린도어와 선로 측 사이의 승객 또는 작업자 감지 기능)에 해당하는 안전 무결성 수준은 정량적 할당 방법론을 통해 할당된 결과와 동일하게 Level 4임을 확인 할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 최근 사고가 빈번히 발생하고 있는 지하철 승강장 스크린도어 시스템의 주요 위험요인(승강장 스크린도어와 선로 측간의 승객 또는 작업자 미 감지)을 선정하여 철도 관련 유럽 기술 규격인 “PD CLC/TR, 50451 Railway applications - Systematic allocation of safety integrity requirements4)”에 정의된 정량적 안전 무결성 할당 방법론을 적용하여 SIL 할당을 수행하였으며, 정량적 할당 방법론 적용 시 소요되는 시간과 노력을 줄이기 위하여 반 정량적 리스크 저감 요소를 적용한 방법론을 제시하고 적용하여 결과를 비교 검토하였다. 이를 통해 정량적 방법론을 통해 ‘승강장 스크린도어와 선로 측간의 승객 또는 작업자 미 감지’의 위험요인 발생률을 1.58×10⁻¹¹(per hour)이하로 제어해야 하며 이로 인해 발생 가능한 사고를 허용 가능한 수준으로 충분히 제어하기 위해서는 승강장 스크린도어와 선로 측 사이의 승객 또는 작업자 감지 기능을 Level 4에 해당하는 안전 무결성 수준에 부합하도록 시스템 개발 초기부터 국제규격3)에

따라 안전성 보증 활동을 수행하고 최종적으로 시스템 운영 전에 안전성을 입증할 필요가 있음을 확인 하였다. 이와 함께 본 연구에서 제시한 반 정량적 리스크 저감요소를 적용한 할당 방법론을 통해 동일하게 할당한 결과 해당 위험요인과 관련한 허용 위험요인 발생률이 1.14×10^{-10} (per hour)로 산출되었다. 이러한 두 가지 방법론에 의한 THR 산출 결과는 약 1.39×10^{-1} (per hour)의 차이가 존재하며, 국제규격에 근거한 정량적 할당 방법론이 반 정량적 리스크 저감 요소를 적용한 할당 방법론보다 더 보수적인 결과가 산출됨을 확인 하였다. 하지만, 이러한 차이는 Table 1에 따라 실제 할당되는 안전 무결성 수준에 있어서는 동일한 수준의 결과가 할당 되는 수준으로서 반 정량적 리스크 저감요소를 적용하더라도 실제 할당 결과는 동일하게 산출됨을 할 수 있다.

결론적으로, 본 연구를 통하여 승강장 스크린도어 시스템의 안전 무결성 수준을 정량적 방법론에 따라 할당하기 위해서는 국가별 또는 관련 산업계를 통해 적절한 수준의 허용가능 개별 리스크(TIR)가 필수적으로 사전 정의되어야 하며, 시스템 운영조건 및 사고발생 시나리오와 관련된 결과분석이 수행되어야 하고 많은 가정 사항들이 적용되어야 함을 알 수 있었다. 이러한 정량적 할당 방법론을 적용하기 어려운 상황에서는

본 연구에서 제시한 반 정량적 리스크 저감요소를 고려한 방법론을 적용함으로써 많은 시간과 노력이 소요되는 운영조건의 정량화 작업 및 결과분석(예, ETA) 등을 생략 가능하고 정성적인 분류 기준을 통해 단순화된 정량적 기준을 적용함으로써 실제 안전 무결성 할당 수행 시 효율성 증대 및 적용의 용이성에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- 1) IEC61508, Functional Safety of Electrical / Electronic / Programmable Electronic Safety-related Systems, Part 5, IEC, pp. 10-44, 2010.
- 2) IEC62278, Railway Applications - Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS), IEC, pp. 49 - 53, Annex D, 2002.
- 3) IEC62425, Communication, Signalling and Processing Systems - Safety Related Electronic Systems for Signalling IEC, pp. 33-46, 2007.
- 4) PD CLC/TR, 50451 - Railway Applications - Systematic Allocation of Safety Integrity Requirements British Standards, pp. 18-42, 2007.