Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol. 29, No. 2 pp.241-248, April 2010 DOI:10.5143/JESK.2010.29.2.241

철도 분야의 인적 오류 사고 분석을 위한 사고발생 모형의 제안

김동산[1] · 백동현[2] · 윤완철[3]

[1]연구개발인력교육원(KIRD) 경영전략팀 / [2]한양대학교 ERICA캠퍼스 경영학부 /
[3]KAIST 지식서비스공학과

A Proposition of Accident Causation Model for the Analysis of Human Error Accidents in Railway Operations

Dong San Kim[1], Dong Hyun Baek[2], Wan Chul Yoon[3]

[1]Management & Strategy Team, Korea Institute of R&DB Human Resources Development, Daejeon, 305-340
[2]Department of Business Administration, Hanyang University, Ansan, 426-791
[3]Department of Knowledge Service Engineering, KAIST, Daejeon, 305-701

ABSTRACT

In accident analysis, it is essential to understand the causal pathways of the accident. Although numerous accident models have been developed to help analysts understand how and why an accident occurs, most of them do not include all elements related to the accident in various fields. Thus analysis of human error accidents in railway operations using these existing models may be possible, but inevitably incomplete. For a more thorough analysis of the accidents in railway operations, a more exhaustive model of accident causation is needed. This paper briefly reviews four recent accident causation models, and proposes a new model that overcomes the limitations of the existing models for the analysis of human error accidents in railway operations. In addition, the usefulness and comprehensiveness of the proposed model is briefly tested by explaining 12 railway accident cases with the model. The proposed accident causation model is expected to improve understanding of how and why an accident/incident occurs, and help prevent analysts from missing any important aspect of human error accidents in railway operations

Keyword: Accident causation model, Accident analysis, Human error analysis, Railway accident

1. 서 론

사고에 개입된 인적 오류(human error)를 분석하는 데에 있어서 사고의 발생 경위, 즉 시간 순서에 따라 어떤 단위 사건(event)들이 어떤 인과관계에 의해 발생했으며 그로 인해 어떤 결과가 초래되었는지를 제대로 파악하는 것은 필수적이다. 사고의 경위를 어떻게 파악하느냐에 따라 사고의 원인과 유사 사고의 재발을 막기 위한 예방대책이 달라질 수 있기 때문이다. 그러나 사고의 발생 경위를 제대로 파악하는 일이 항상 쉬운 것은 아니다. 특히 대형 사고의 경우는 다양한 단위 사건 및 환경 조건들(conditions)이 포함

*본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(05철도안전B-02)에 의해 수행되었습니다.
교신저자: 백동현
주 소: 426-791 경기도 안산시 상록구 사3동 1271 경상대학 521호, 전화: 010-8253-3307, E-mail: estarbaek@hanyang.ac.kr

되기 때문에 이들 간의 인과관계를 분석하는 것은 쉽지 않다. 체계적인 방법이나 도구가 없으면 같은 사고를 분석하더라도 조사자 또는 분석자에 따라 그 분석 결과가 달라질 수 있으며, 중요한 요소를 빼먹기도 쉽다.

체계적인 인적 오류 분석을 지원하기 위해 그 동안 다양한 사고 분석기법들 및 인적 행위 분석기법들이 개발되었고, 그 중 일부는 실제 현업에서의 사고 분석에 사용되고 있다. 대표적인 사고 분석기법에는 고장수목 분석(fault tree analysis), 방지벽 분석(barrier analysis), 변화요인 분석(change analysis), STEP(Sequentially Timed Events Plotting) 등이 있고(Sklet, 2004), 대표적인 인적 행위 분석기법으로는 원자력 분야의 HPES(Human Performance Enhancement System)와 HPIP(Human Performance Investigation Process), 항공 분야의 HFACS(Human Factors Analysis and Classification System) 등이 있다(김동산 등, 2007; 신민주 등, 2008).

그러나 효과적인 인적 오류 분석기법을 개발하거나 주어진 분석기법들을 필요에 따라 적절히 사용하기 위해서는 먼저 인적 오류가 개입된 사고가 어떻게 발생하게 되는지를 제대로 이해하는 것이 필요하다. 따라서 현업에서의 인적 오류 분석을 지원하기 위해서는 인적 오류 분석을 위한 기존의 사고발생 모형들이 가진 한계점을 파악하고 이를 보완할 수 있는 새로운 사고발생 모형의 제안이 요구된다.

본 논문에서는 먼저 인적 오류 분석을 위한 기존의 대표적인 사고발생 모형들을 소개하고, 각 모형의 단점을 보완한 새로운 사고발생 모형을 제안한다. 2장에서는 인적 오류 분석을 위한 기존의 사고발생 모형들을 두 가지 유형으로 분류하고 유형별로 대표적인 모형들을 소개한다. 3장에서는 제안하는 사고발생 모형을 설명하고, 4장에서는 몇 가지 철도 사고 사례들을 통해 제안한 사고발생 모형의 적절성을 검토한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 기여도 및 추후 연구 방향을 설명한다.

2. 인적 오류 분석을 위한 기존의 사고발생 모형들

모형이 개발된 목적과 그것이 다루는 범위에 따라 다양한 사고발생 모형들이 개발된 바 있다. 안전 분야에서 널리 알려진 대표적인 모형으로는 소위 도미노 이론(Domino Theory)가 있는데, 사고는 도미노패가 잇따라 넘어지듯이 일련의 사건 또는 상황들이 일정한 순서에 따라 연쇄적으로 발생한 것으로 설명하고 있다(Heinrich et al., 1980). Heinrich(1931)에 의해 창시된 이후 여러 연구자들에 의해 보완되었다(Bird, 1974; Weaver, 1971; Adams, 1976). 그 밖에도 사건수목(event trees), 고장수목(fault trees), MORT(Management Oversight and Risk Tree), SHEL(Software-Hardware-Environment-Liveware) 모형, CFAC(Contributing Factors in Accident Causation) 모형 등이 있다(Lehto & Salvendy, 1991; Wiegmann & Shappell, 2003). 본 논문에서는 여러 가지 사고발생 모형 중 인적 오류 분석에 초점이 맞춰진 모형들을 소개하고자 한다.

특정한 목적에 맞게 설계된 시스템과 그것을 설계, 운영, 관리하는 사람이 존재하는 영역에서 사고는 시스템 고장과 인적 오류를 포함한 다양한 단위 사건(event)의 발생 및 전개로 인한 결과이다. 하나의 단위 사건이 발생했을 때 그것이 다른 단위 사건 또는 사고의 발생으로 이어지지 않도록 막기 위한 방법은 크게 두 가지로 구분된다. 하나는 미리 설계된 방지벽 또는 방어 시스템이 자동적으로 작동되는 것이고, 다른 하나는 사람이 직접 대응(response)하는 것이다. 따라서 발생한 사고에 개입된 인적 오류 행위를 제대로 분석하려면 시간 순서에 따라 어떤 단위 사건들이 발생했는지를 분석하는 것은 물론이고, 단위 사건 간의 전개를 막을 수 있었던 방지벽들이 무엇이 있었고 왜 실패했는지와 사람의 대응 과정이 왜 실패했는지를 면밀히 분석해야 한다. 2.1절과 2.1절에서는 각각 방지벽(또는 방어 시스템)과 인간 대응, 두 가지 관점으로 나누어 인적 오류 분석에 초점을 맞추고 있는 대표적인 모형들을 소개하도록 하겠다.

2.1 방지벽 중심의 사고발생 모형

사고의 발생에 있어 방지벽의 역할을 강조한 대표적인 사고발생 모형으로는 Reason(1995)의 조직적 사고발생 모형(model of organizational accident causation)과 Svenson(1991)의 AEB(Accident Evolution and Barrier Function) 모형이 있다.

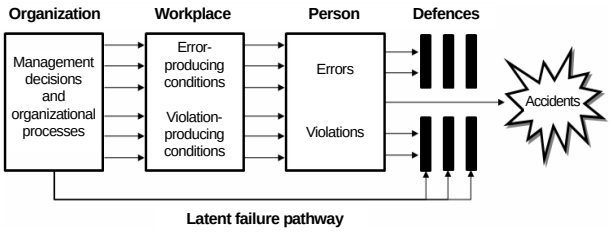

그림 1. Reason's model of organizational accident causation

Reason의 조직적 사고발생 모형(그림 1)에 따르면 단순히 하나의 인적 오류로 인해 사고가 발생하는 것이 아니라,

현장 작업자들(sharp-end operators)의 인적 오류에 영향을 미칠 수 있는 작업장의 조건, 경영층에서의 의사결정, 조직의 프로세스 등 여러 단계의 방지벽들(barriers or defenses)이 차례로 무너질 때 사고가 발생한다. 즉, 사고발생의 근본적 원인이 현장 작업자들의 인적 오류라기 보다는 조직의 오류(organizational error)임을 강조한다(Reason, 1997). Reason의 모형은 항공 분야에서 개발된 HFACS를 비롯하여 여러 인적 오류 분석기법의 기초가 되었고, 기존의 사고 사례들을 시스템적 관점에서 재분석하는 데에도 활용되고 있다(Lawton, et al., 2005).

그러나, 이 모형은 다음과 같은 한계점을 갖고 있다: 1) 단위 사건으로 인적 실패(human error and violation)만 포함하고 있고, 기술적 실패(technical failure)와 외부에서의 침입(external intrusion)의 발생은 포함하지 않는다; 2) 방지벽(barriers or defenses)의 역할을 강조하고 있고, 발생한 오류에 대한 인간의 대응 과정(error detection and recovery)은 상대적으로 강조되지 않는다; 3) 피드백 루프(feedback loop)가 존재하지 않아 여러 단위 사건들의 사슬(event chain)을 모형화할 수 없다.

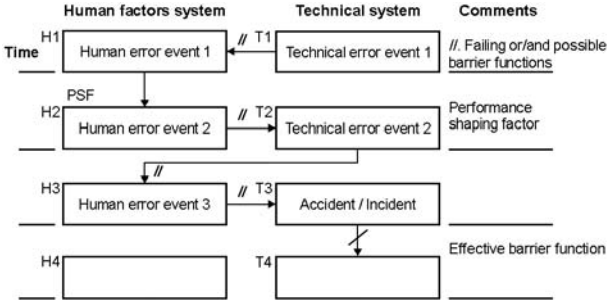

그림 2. Accident Evolution and Barrier Function(AEB) model

AEB 모형은 사고의 전개 과정을 인간 시스템과 기술적 시스템간의 일련의 상호작용으로 모형화한다(그림 2). 이 모형은 다수의 방지벽 기능들(barrier functions)이 왜 실패했고, 어떻게 하면 그것들이 다른 방지벽 기능들에 의해 강화되거나 지원될 수 있는지를 파악하는데 초점을 맞춘다. 따라서 연속되는 오류사건 박스 사이의 연결고리마다 해당 연결고리를 막는데 실패한 방지벽 기능과, 존재했다면 막을 수 있었던 방지벽 기능이 무엇인지를 파악한다(Svenson, 2001).

AEB 모형은 인적 실패뿐만 아니라 기술적 실패를 함께 고려하도록 하고 있고, 흐름도(flow diagram)를 사용해 단위 사건의 사슬을 표현할 수 있다는 점에서 앞서 설명한 Reason의 모형의 한계점을 보완하고 있다. 그러나, 이 모형은 발생 가능한 단위 사건의 종류를 인적 실패와 기술적 실패의 두 가지로만 구분했다는 점과 발생한 오류에 대한 인간의 대응 과정(error detection and recovery) 및 오류 발생에 영향을 미칠 수 있는 조직 요인들(organizational factors)에 대한 고려가 미흡하다는 점이 한계이다.

2.2 인간 대응 중심의 사고발생 모형

발생한 단위 사건, 특히 인적 오류에 대한 인간의 대응 과정의 역할에 대해서는 방지벽 또는 방어 시스템의 역할에 비해 상대적으로 덜 알려져 있다(Kanse & van der Schaaf, 2001). 그러나, 90년대 이후로 일부 연구자들에 의해 발생한 인적 오류에 대한 사람의 대응 과정 및 메커니즘이 어느 정도 밝혀졌고(Rizzo et al., 1995; Kontogiannis, 1999; Sarter & Alexander, 2000; Kanse & van der Schaaf, 2001), 최근에는 인적 오류의 감지(detection) 및 복구(recovery) 과정에 대한 분석 단계를 포함한 인적 오류 분석기법들이 개발되었다(Shorrock & Kirwan, 2000; Gordon et al., 2005; RSSB, 2005). 인간의 대응 과정을 강조한 사고발생 모형으로는 Gordon 등의 모형(Gordon et al., 2005)과 Kanse와 van der Schaaf의 failure compensation process 모형(Kanse & van der Schaaf, 2000) 등이 있다.

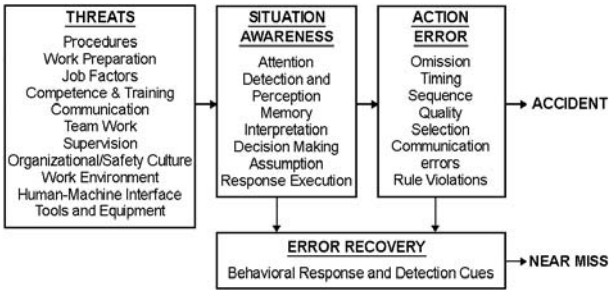

그림 3. HFIT model of incident causation

Gordon 등의 모형(그림 3)은 인적 오류의 발생에 영향을 미칠 수 있는 상황적 요소들로 시작하여 사고의 발생 단계까지 사고의 인과적 전개 과정을 설명하고 있다는 점에서 앞서 언급한 Reason의 모형과 유사하다. 그러나, Reason의 모형에서 방어 시스템(defenses) 부분 대신 '오류 복구(error recovery)' 단계를 추가함으로써 부적절한 상황인식 또는 오류 행위가 사고로 이어지기 전에 제대로 감지되고 복구되면 아차 사례(near miss)로 끝나게 됨을 설명하고 있다. Gordon 등은 또한 이 모형을 기반으로 HFIT(Human Factors Investigation Tool)라는 인적 오류 분석기법을 개발하였다(Gordon et al., 2005). HFIT 모형은 Reason의 모형과 마찬가지로 단위 사건으로 인적 실패(error and

violation)만 포함하고 있고, 피드백 루프가 존재하지 않아 여러 단위 사건들의 사슬을 모형화할 수 없다. 또한, Reason의 모형과는 반대로 발생한 인적 실패에 대한 인간의 대응만을 강조하고 미리 설계된 방어 시스템의 역할은 명시적으로 고려하고 있지 않다는 데에 그 한계가 있다.

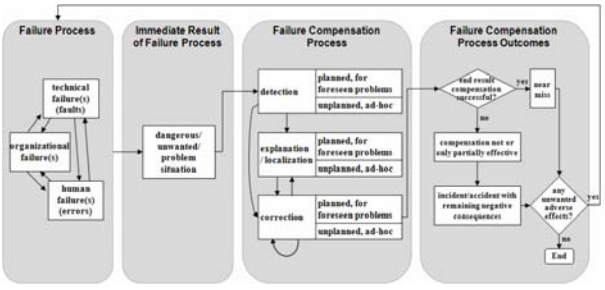

그림 4. Failure compensation process(FCP) model

Failure compensation process(FCP) 모형(그림 4)은 인적 실패, 기술적 실패, 조직적 실패를 포함한 실패(failure) 사건의 발생에서부터 발생한 실패를 미리 설계된 방어 시스템 또는 사람이 감지(detection), 설명(explanation), 교정(correction)하는 실패 보정(failure compensation) 절차, 실패 보정으로 인한 결과까지의 전체 과정을 구체적으로 설명할 수 있다는 점에서 다른 사고발생 모형들과 구별된다. 또한, 피드백 루프를 명확히 표현하고 있는 점도 구별된다. 그러나 이 모형은 Reason의 모형 및 HFIT 모형과는 달리 실패 사건의 발생에 영향을 미칠 수 있는 작업환경적 요인들과 조직 요인들을 명시적으로 나타내고 있지는 않다.

3. 사고발생 모형 제안

2장에서 설명한 사고발생 모형들은 각기 장점을 갖고 있지만, 사고에 개입된 인적 오류 분석과 관련된 모든 요소들을 포함하고 있지 못하다. 따라서 이 모형들 중 하나를 사용하여 사고를 분석하는 것은 효과적일 수는 있지만 그 분석 내용이 불완전할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 5와 같이 기존의 사고발생 모형들이 가진 한계점을 보완하여 새롭게 설계된 사고발생 모형을 제안한다. 이 모형은 하나의 사고(accident/incident) 또는 아차 사례(near miss)가 어떻게 발생하게 되는지, 즉 사고의 발생에 앞서 어떤 종류의 단위 사건들이 발생하고, 어떤 요인들이 단위 사건의 발생에 영향을 미치며, 단위 사건 또는 사고의 발생을 어떻게 방지할 수 있는지를 설명한다.

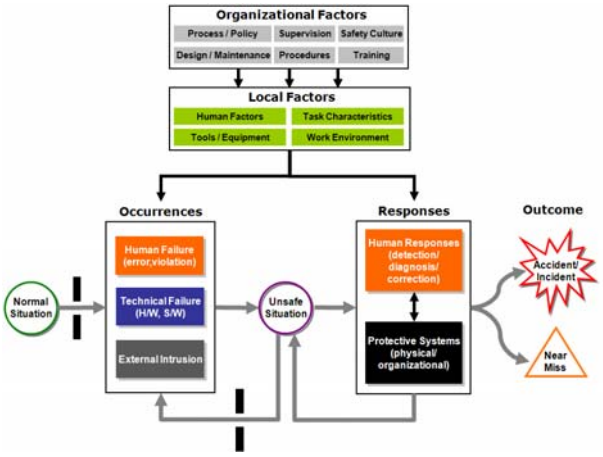

그림 5. 제안하는 사고발생 모형

이 모형에 따르면, 사고는 문제가 없는 정상적인 상황(normal situation)에서 미리 설계된 방지벽을 뚫고 어떤 단위 사건이 발생(occurrence)함으로써 시작된다. 발생 가능한 단위 사건은 인적 오류와 위반 행위를 포함한 인적 실패(human failure), 하드웨어나 소프트웨어의 오작동 또는 고장에 해당하는 기술적 실패(technical failure), 외부에서 특정 방해물이 침입하는 외부 침입(external intrusion)의 세 가지로 구분된다.

하나의 단위 사건이 발생하면 운행 중인 전체 시스템은 불안전한 상황(unsafe situation)에 처하게 된다. 불안전한 상황에서는 두 가지 가능성이 존재한다.

첫째, 미리 설계된 방지벽을 뚫고 또 다른 단위 사건이 발생(그림 5의 좌측 아래 피드백 루프)하여 더 불안전한 상황에 처할 수 있다.

둘째, 발생한 단위 사건이 감지(detection), 진단(diagnosis), 교정(correction)되는 대응(response) 과정이 일어날 수 있다. 이 대응 과정은 사람(개인 또는 팀)이 직접 대응(human response)하거나 미리 설계된 방지벽 또는 방어 시스템(protective system)이 그 역할을 대신하거나 사람과 방어 시스템 간 상호작용을 통해 일어날 수도 있다. 이러한 대응 과정이 제 때 제대로 이루어지거나 운이 좋으면 아차 사고(near miss)로 그칠 수 있지만, 그렇지 않으면 불안전한 상황이 계속되거나(그림 5의 우측 아래 피드백 루프) 결국 사고(accident/incident)가 발생할 수 있다.

발생한 단위 사건에 대한 인적 대응 과정이 실패한 경우도 인적 실패에 해당한다고 볼 수 있지만, 그림 5에서 '인적 실패(human failure)'는 사람의 잘못으로 인해 새롭게 발생한 단위 사건을 의미하고, '인적 대응(human response)'은 이미 발생한 단위 사건(인적 실패, 기술적 실패, 외부 침입)에 대한 사람의 대응 과정(성공과 실패를 모두 포함)을 의미

한다. 또한 인적 대응 과정에서의 대응 주체는 인적 실패를 야기한 사람(예. 기관사)뿐만 아니라 협업하는 다른 사람들(예. 관제사, 역무원, 승무원, 승객)을 포함한다. 인적 대응 과정을 인적 실패를 포함한 단위 사건의 발생과 구분하여 표현한 것은 특정한 단위 사건(들)이 발생하더라도 개인 또는 팀이 적절히 대응을 하면 사고의 발생을 막을 수 있다는 것을 강조하기 위함이다.

그림 5에서 아래의 두 가지 피드백 루프는 단위 사건의 발생(occurrences) 부분과 단위 사건에 대한 대응(responses) 부분 둘 다 주기적인(cyclical) 과정임을 나타낸다. 사고 또는 아차 사례로 끝나기 전에 둘 이상의 단위 사건(인적 실패, 기술적 실패, 외부 침입)이 발생할 수 있다. 예를 들어, 하나의 인적 오류가 또 다른 인적 오류를 일으키거나 기술적 문제를 일으킬 수 있다. 마찬가지로 사고 또는 아차 사례로 끝나기 전에 두 번 이상의 대응 과정이 발생할 수 있다.

사고가 발생한 후에도 조치 및 대응 과정이 존재하지만, 다른 사고발생 모형들과 마찬가지로 이 모형 또한 사고 후 대응 및 조치 과정은 생략하였다.

그림 5에서 위 쪽에 위치한 두 가지 박스와 같이 단위 사건의 발생 및 발생한 단위 사건에 대한 대응 과정에는 다양한 요인들이 영향을 미칠 수 있다. 주변 요인들(local factors)로는 작업자의 신체적 상태, 정신적 상태, 지식, 경험, 능력 등을 포함하는 인적 요인(human factors), 작업자가 수행하는 직무의 특성(task characteristics), 밝기, 온도, 소음 등 작업 환경(work environment)의 특성, 작업자가 직무를 수행하는 사용하는 도구 및 장비 등이 있다. 또한 이러한 직접 요인들에 영향을 미치는 간접적인 요인들로는 조직의 프로세스 및 정책, 관리 및 감독, 안전 문화, 시스템 설계 및 유지보수, 규정 및 절차, 교육훈련 등의 조직 요인들(organizational factors)이 있다.

표 1은 2장에서 설명한 네 가지 사고발생 모형들과 본 논문에서 제안하는 사고발생 모형을 비교하고 있다. 원(○)으로 표기된 것은 해당 모형이 해당 구성요소를 명확하게 포함하고 있음을 나타내고, 세모(△)로 표기된 것은 해당 구성요소를 고려했다고는 할 수 있지만 불충분하거나 모형에 명시적으로 표현하지 않았음을 의미하며, 'X'로 표기된 것은 해당 구성요소를 포함하지 않았음을 의미한다. 표 1에서 알 수 있듯이 기존의 사고발생 모형들과 비교하여 본 논문에서 제안하는 사고발생 모형이 가진 특징은 다음과 같이 정리할 수 있다:

1) 발생 가능한 단위 사건으로 인적 실패, 기술적 실패, 외부 침입을 모두 고려한다. 2장에서 설명한 네 가지 사고발생 모형 모두 발생 가능한 단위 사건으로 "외부 침입"을 포함하고 있지 않은데, 발전소나 병원과 같이 닫힌 체계(closed system)와는 달리 철도, 항공, 선박 시스템과 같은 열린 체계(open system)에서는 열차가 달리는 선로 위에 사람 또는 장애물이 침입하는 것과 같은 단위 사건이 포함되어야 한다.

2) 이미 발생한 단위 사건에 대한 대응 과정에서 인적 대응(human response)과 방어 시스템(protective system)의 대응을 둘 다 동등한 비중으로 고려한다. 이 점에서는 FCP 모형(그림 4)도 마찬가지이지만, 제안한 사고발생 모형은 FCP 모형에 비해 이 둘을 이해하기 쉬운 용어로 명확하게 구분하고 있으며 이 둘 간의 상호작용(그림 5의 양방향 화살표) 또한 고려한다.

3) 단위 사건(특히 인적 실패)의 발생에 영향을 미칠 수 있는 요인들을 크게 2개 수준, 주변 요인(local factor)과 조직 요인(organizational factor)으로 구분하고 각 수준에서의 구체적인 카테고리들을 제시하고 있다.

4) 사고의 전개 과정에서 가능한 2가지 피드백 루프(feedback loop), 즉 불안전한 상황(unsafe situation)에서 다시 새로운 단위 사건이 발생하는 경우와 대응(responses) 단계의 실패로 인해 제2의 불안전한 상황이 전개되는 경우

표 1. 사고발생 모형 비교

Components \ Models		Reason's model	AEB model	HFIT model	FCP model	Proposed model
Occurrences (adverse events)	Human failures	○	○	○	○	○
	Technical failures	X	○	X	○	○
	External intrusions	X	X	X	X	○
Responses	Protective systems (barriers)	○	○	X	○	○
	Human responses	△	△	○	○	○
Outcome (accident/incident/near miss)		○	○	○	○	○
Workplace & Organizational factors		○	△	○	△	○
Feedback loop (event chain)		X	○	X	○	○

를 표현함으로써 하나의 사고가 발생하기까지의 여러 단위 사건들의 사슬(event chain)을 모형화하기 쉽도록 하고 있다.

4. 철도 사고 사례에의 적용

3장에서 제시한 사고발생 모형이 사고의 발생 경위 및 원인을 제대로 설명하는지를 검토하기 위해 철도 분야의 사고 사례들을 이 사고발생 모형을 사용하여 재분석하였다. 검토에 사용할 사고 사례를 무작위로 선정하기 위해 최근 교통안전공단에서 발행한 해외 철도 사고 사례집(교통안전공단, 2004)에 포함된 16개의 사고 사례 중 업무종사자의 인적 오류가 포함된 12개의 사례들을 배제하지 않고 모두 사용하였다. 이 사례들은 미국, 캐나다, 영국에서 1997년부터 2003년까지 발생했던 철도 사고들이다. 이중 8건은 충돌 또는 탈선 사고이며, 2건의 건널목 사고와 2건의 사상 사고도 포함하였다. 이 사례들을 사용한 이유는 최근에 발생한 다양한 유형의 사고들이 포함되어 있고, 사고의 발생 경위가 비교적 구체적으로 기술되어 있기 때문이다.

표 2. 제안한 사고발생 모형 검증 결과

사고 사례	사고 유형	사고 개요 및 경위
사례1	충돌/탈선	기관사와 차장의 제동장치 취급오류에 의한 열차충돌 및 탈선
		NS → HF → US1 → HR(오류) → US2 → EI → US3 → HR(실패) → Ac
사례2	건널목	트럭운전자의 판단오류에 의한 건널목충돌
		NS → {PS(부재)→EI} → US → HR(실패) → Ac
사례3	충돌	기관사의 상황인식 오류에 의한 열차추돌
		NS → HF → US1 → EI → US2 → HR(실패) → Ac
사례4	충돌	선로위 천정타일 보수 중 안전조치 미실시에 의한 열차와 작업대 충돌
		NS → HF1 → US1 → HF2 → US2 → EI → US3 → HR(실패) → Ac
사례5	사상	선로 작업자들의 작업규정 미준수로 인한 열차와 작업자 간 충돌
		NS → HF1 → US1 → HF2 → US2 → HF3 → US3 → EI → US4 → HR(실패) → Ac
사례6	탈선	분기기 고장 및 운전사령과 신호기 관리자의 판단오류에 의한 열차탈선
		NS → TF1 → US1 → HR1(오류) → US2 → HR2(오류) → US3 → TF2 → Ac
사례7	탈선	조직의 안전조치 미실시와 기관사의 규정 미준수에 의한 열차탈선
		NS → HF1 → US1 → HF2 → US2 → HF3 → Ac
사례8	건널목	경보장치의 고장과 트럭운전자의 과실에 의한 건널목 충돌
		NS → TF → US1 → HR(오류) → US2 → EI → US3 → HR/PS(실패) → Ac
사례9	충돌/탈선	교차 스위치의 고장 및 기관사와 차장의 과실에 의한 열차충돌 및 탈선
		NS → TF → US1 → EI → US2 → HR(실패) → Ac
사례10	충돌	비상제동장치의 고장 및 설계/건설/감독 기관의 업무소홀로 인한 경사철도 열차충돌
		NS → TF → US → {HR→PS(실패)} → Ac
사례11	탈선	선로의 균열 및 점검 소홀로 인한 탈선
		NS → TF → US → HR(실패) → Ac
사례12	사상	어린이의 선로 침입으로 인한 공중사상
		NS → {PS(부재)→EI} → US → HR(실패) → Ac

표 2는 12개의 사고 사례들의 사고 경위를 3장에서 제안한 사고발생 모형을 사용하여 재구성한 결과를 정리한 것이다. 각 사례에 순서대로 일련번호를 붙였고 사고 유형 및 사고에 대한 간략한 개요를 함께 기술하였다. 또한, 사고발생 모형(그림 5)의 8가지 구성요소들을 편의상 다음과 같은 약자로 표현하였다:

- NS: Normal Situation
- HF: Human Failure
- TF: Technical Failure
- EI : External Intrusion
- US: Unsafe Situation
- HR: Human Response
- PS : Protective System
- Ac : Accident/Incident

표 2에서 약자로 표현된 사고 경위는 전체 시스템의 상태(state or situation)와 인간 또는 다른 주체의 행위(action or event)가 번갈아 가며 나타남을 알 수 있다. 사고의 경위는 항상 정상 상황(NS)에서 시작한다. 검증에 사용된 사례들은 모두 '아차 사례(near miss)'가 아닌 '사고(accident or incident)'에 해당하기 때문에 모두 대응(response) 과정, 즉 불안전한 상황에 대한 인간의 대응(HR) 및 방어 시스템의 대응(PS)이 실패하여 사고의 발생(Ac)으로 끝난다. 사고 경위에서 '기술적 결함(TF)'은 선행 사건으로 유지보수

원의 인적 실패(HF)가 발생했기 때문에 일어나는 경우가 대부분이지만, 여기서 유지보수원의 일상적 점검 행위까지 고려하지는 않았다.

표 3은 표 2에서 약자로 표현된 사고 경위들이 어떻게 작성된 것인지를 '사례 1'을 예시로 들어 정리한 것이다. 12개의 사례들 모두 이런 방식으로 사고 경위를 정리할 수 있다.

표 3. "사례 1"의 사고발생 경위

사고 경위	사고발생 모형 구성요소
콘레일 소속 열차는 사고발생 1시간 전 일리노이주 캥커키를 출발하여 동쪽으로 운행함. 열차가 모멘스 교차로 통제지점의 원방 신호기에 접근할 때 열차는 약 44mph의 속도로 운행 중이었음.	NS
열차가 곡선 선로를 달리는 동안 선로를 따라 큰 나무들이 둘러쳐져 있었기 때문에 기관사와 차장 모두 장내 신호기를 볼 수 없었고 열차가 곡선 선로를 빠져나와 직선 선로를 접어들었을 때는 신호기가 너무 멀리 떨어져 있어서 육안으로 확인이 불가능했음.	HF
불안전한 상황에서 계속 운행	US1
차장은 쌍안경을 사용해 신호기를 확인하고 기관사에게 신호기가 빨간색임을 알렸고 곧 제동장치를 비상상태로 작동시키라고 말함. 기관사는 그 즉시 제동장치를 단계적으로 작동했지만 양방향 열차 후미 제동장치는 작동시키지 않았음.	HR(오류)
불안전한 상황에서 계속 운행	US2
한편 남쪽을 향해 달리던 UP 소속 열차는 교차로 지점에 근접함.	EI
불안전한 상황에서 계속 운행	US3
콘레일 소속 열차는 교차로 전방 474피트 지점에서 비상 제동장치를 작동하여 열차의 속도가 줄어들기는 했지만 정지시키지 못함.	HR(실패)
결국 교차로 부분으로 진입하여 통과 중이던 UP 소속 열차 기관차의 앞부분과 충돌하여 콘레일 열차의 앞쪽 기관차와 UP 열차의 기관차 두 대 및 차량 16대가 탈선함.	Ac

사례 분석 결과, 사고 경위를 설명하는 데 있어 제안한 사고발생 모형의 각 구성요소들이 골고루 사용됨을 알 수 있었다. 8개의 구성요소 모두 12개 사례 중 4개(33%) 이상의 사례를 설명하는 데 사용되었고, PS를 제외한 나머지 구성요소들은 5개(42%) 이상의 사례를 설명하는 데 사용되었다. 또한, 둘 이상의 인적 오류 행위가 개입된 사고 사례들도 잘 설명할 수 있었다(사례 4, 5, 6, 7).

5. 결론 및 검토

본 논문에서는 인적 오류가 개입된 사고의 경위를 이해하고 분석하는 데 있어 사고발생 모형의 역할이 중요함을 언급하고, 인적 오류 분석을 위한 기존의 대표적인 사고발생 모형들을 소개하였으며, 이 모형들의 한계점을 보완한 새로운 사고발생 모형을 제안하였다.

또한, 본 논문에서는 철도 분야의 사고 사례들에 적용함으로써 제안한 사고발생 모형이 적절한지를 살펴보았다. 이를 통해 다양한 유형의 사고들이 발생하는 과정을 설명하는 데 있어 제안한 사고발생 모형의 모든 구성요소들이 유효성을 확인할 수 있었다.

제안한 사고발생 모형은 철도 분야에서 인적 오류가 개입된 사고의 발생 경위에 대한 이해를 높이고, 분석자로 하여금 인적 오류를 포함한 단위 사건 간 인과관계 파악, 인적 오류가 발생하게 된 직접적 원인 및 조직 수준의 원인 분석, 발생한 인적 오류에 대한 대응 과정 분석 등 인적 오류 분석의 중요한 부분들을 빠뜨리지 않고 체계적으로 분석할 수 있도록 도울 수 있을 것이다.

본 논문에서 제안한 사고발생 모형의 철도 분야 적용 타당성을 검증하기 위해서는 추가 연구가 필요할 것이다. 또한 본 논문에서 모형에 적용한 사례들은 모두 사고(accident or incident)에 해당하며 아차 사례(near miss)는 포함하지 않았다. 대응 과정이 성공적으로 이루어져 손실이 없었던 아차 사례들에도 이 모형을 적용해볼 수 있을 것이다.

또한 제안한 사고발생 모형은 특정 분야에 국한되지 않고 다양한 분야에서의 사고들을 설명하기 위한 일반적 모형이 되기 위해서는 발전, 항공, 선박, 의료 등의 다른 산업 분야에서의 사고들에도 적용해 보는 것이 필요하다. 해당 분야의 특성을 반영한 모형으로 수정해야 할 것이다.

또한 이 사고발생 모형을 기반으로 하여 구체적인 인적 오류 분석 방법론이 개발된다면 현업에서 인적 오류가 개입된 사고를 분석하는 데에 보다 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

교통안전공단, 해외 철도사고 사례, 철도교통안전 34, 2004.

김동산, 백동현, 윤완철, 인적오류 분석기법의 국내외 활용 현황 및 국내 철도 산업에의 적용 방안, *한국철도학회논문집*, 10(1), 7-15, 2007.

신민주, 백동현, 김동산, 윤완철, 철도 사고 인적 오류 분석을 위한

지원 시스템 프레임웍 설계, *대한인간공학회지*, 27(3), 43-52, 2008.

Adams, E., Accident causation and the management system, *Professional Safety*, 21(10), 26-29, 1976.

Bird, F., *Management Guide to Loss Control*, Atlanta, GA: Institute Press, 1974.

Gordon, R., Flin, R. and Mearns, K., Designing and evaluating a human factors investigation tool(HFIT) for accident analysis, *Safety Science*, 43, 147-171, 2005.

Heinrich, H. W., *Industrial Accident Prevention*, McGraw-Hill: New York, 1931.

Heinrich, H. W., Petersen, D. and Roos, N., *Industrial Accident Prevention* (5th ed.), McGraw-Hill: New York, 1980.

Kanse, L. and Van der Schaaf, T. W., Recovery from failures in the chemical process industry, *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(3), 199-211, 2001.

Kontogiannis, T., User strategies in recovering from errors in man-machine systems, *Safety Science*, 32, 49-68, 1999.

Lawton, R. and Ward, N. J., A systems analysis of the Ladbroke grove rail crash, *Accident Analysis & Prevention*, 37, 235-244, 2005.

Lehto, M. and Salvendy, G., Models of accident causation and their applications: Review and reappraisal, *Journal of Engineering and Technology Management*, 8, 173-205, 1991.

Reason, J., A systems approach to organizational error, *Ergonomics*, 38, 1708-1721, 1995.

Reason, J., *Managing the Risks of Organizational Accidents*, Ashgate, Aldershot, 1997.

Rizzo, A., Ferrante, D. and Bagnara, S., Handling human error, In J. M. Hoc, P. C. Cacciabue, and E. Hollnagel (Eds.), *Expertise and Technology: Cognition & Human-computer Cooperation*, Lawrence Erlbaum Associates, NJ, 1995.

RSSB, *Rail-specific Human Reliability Assessment Technique for Driving Tasks*, Research Project T270, Final Report, London: Rail Safety & Standards Board, 2005.

Sarter, N. B. and Alexander, H. M., Error types and related error detection mechanisms in the aviation domain: An analysis of aviation safety reporting system incident reports, *International Journal of Aviation Psychology*, 10(2), 189-206, 2000.

Sklet, S., Comparison of some selected methods for accident investigation, *Journal of Hazardous Materials*, 111, 29-37, 2004.

Svenson, O., The accident evolution and barrier function (AEB) model applied to incident analysis in the processing industries. *Risk Analysis*, 11, 499-507, 1991.

Svenson, O., Accident and incident analysis based on the accident evolution and barrier function (AEB) model, *Cognition, Technology & Work*, 3, 42-52, 2001.

Shorrock, S. T. and Kirwan, B., Development and application of a human error identification tool for air traffic control, *Applied Ergonomics*, 33, 319-336, 2000.

Weaver, D., Symptoms of operational error, *Professional Safety*, 104(2), 39-42, 1971.

Wiegmann, D. A. and Shappell, S. A., *A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis: The Human Factors Analysis and Classification System*, Aldershot, UK: Ashgate Publishing Company, 2003.

◐ 저자 소개 ◑

❖ 김 동 산 ❖ dskim@kird.re.kr
KAIST 산업 및 시스템공학과 박사과정
현 재: 연구개발인력교육원 경영전략팀 연구원
관심분야: 인지공학, HCI, HRD/HRM

❖ 백 동 현 ❖ estarbaek@hanyang.ac.kr
KAIST 산업공학과 박사
현 재: 한양대학교 ERICA캠퍼스 경영학부 부교수
관심분야: 인지공학, 경영정보시스템, 성과관리

❖ 윤 완 철 ❖ wcyoon@kaist.ac.kr
Georgia Institute of Technology 산업 및 시스템공학과 박사
현 재: KAIST 지식서비스공학과 학과장
관심분야: 인지공학, 지식서비스, HCI, HR

논 문 접 수 일 (Date Received) : 2009년 03월 30일
논 문 수 정 일 (Date Revised) : 2010년 01월 11일
논문게재승인일 (Date Accepted) : 2010년 01월 13일