

# 고속철도의 예방적 안전관리를 위한 위험도 평가 기준의 이론적 고찰

이병석 · 김현주 · 방명석 · 임광균\*

한국교통대학교 교통전문대학원 교통시스템공학과 · \*송원대학교 철도경영학과  
(2018. 11. 6. 접수 / 2018. 12. 3. 수정 / 2018. 12. 20. 채택)

## Theoretical Considerations on the Risk Assessment Criteria for Preventive Safety Management of High-Speed Railway

Byung Seok Lee · Hyun Ju Kim · Myung Seok Bang · Kwang Kyun Lim\*\*

Korea National University of Transportation Graduate School

\*Department of Railroad Management, Songwon University

(Received November 6, 2018 / Revised December 3, 2018 / Accepted December 20, 2018)

**Abstract** : The Railway Safety Management System is based on risk management and the basic purpose of risk management is safety management activities to prevent railway accidents and operational obstacles in advance. In order to manage risk, an acceptable risk standard must be established. This risk criterion is used to evaluate the railway risk with both frequency and severity. In the case of overseas railway or other industrial sectors, various factors are reflected in the main variables that constitute the occurrence frequency, but this is no the case in the domestic railway sector. In particular, the current risk assessment criteria in the railway sector remain at a level that exploits the incidents that have occurred in the past and the severity of the property damage and it dose not properly reflect complex and diverse environmental and situational changes in railway operations. Therefore, in this study, it is possible to calculate the potential occurrence of future events instead of occurrence frequency as a component of the risk assessment criteria, focusing on the High-Speed Railway. In addition to the property damage to the consequence, we suggest a rational methodology, development direction, and theoretical implications for constructing accurate and reasonable risk criteria including actual damage such as human injury and time loss.

**Key Words** : risk assessment criteria, risk acceptance criteria, frequency, consequence, severity

### 1. 서론

최근 10~20년간 국내의 철도관련 철도사고와 운행 장애, 위험사건 등의 발생률이 상당히 감소했지만<sup>1)</sup>, 사고의 강도 및 중대사고 발생빈도는 크게 낮아지지 않은 실정이다<sup>2)</sup>. 이에 정부는 철도사고를 최소화하고 철도안전에 관한 문제를 전반적으로 개선하기 위해 2012년 철도안전법을 개정하였고, 2014년에는 철도안전관리체계 승인제도를 법제화하였다<sup>3)</sup>. 철도안전관리체계에서 가장 중요한 요소는 위험도 관리이며<sup>4)</sup>, 이미 국내의 항공, 원자력, 선박 등 다양한 산업 분야에서는 일찍부터 위험도 관리체계를 정비하고, 이를 현장에 적용시켜 실효성을 입증해 왔다<sup>5)</sup>.

이에 비해 국내 철도분야의 위험도 관리 수준은 오

랜 기간 정체된 상태였다. 그 동안 국내의 철도 안전관리는 이미 발생한 사고를 수습, 처리하고 원인을 분석하여 재발방지 대책을 마련하는데 주력하는 등 수동적이고 보수적인 경향이 강하였다<sup>6)</sup>. 이로 인해 발생한 모든 위험 요소들을 사전에 파악하여 필요한 안전 대책을 미리 수립하는 ‘예방적 안전관리’는 사실상 부재했다고 볼 수 있다. 이는 다양한 데이터들을 통해 정량적으로 산출된 위험도 평가 기준을 토대로 사후 수습보다는 예방적 안전관리에 주력하고 집중하는 해외 주요국의 철도안전관리체계와는 대조되는 상황이기 때문에, 향후 이에 대한 제도적, 정책적인 보완과 개선이 필요할 것으로 생각된다. 예컨대, 영국 RSSB(Rail Safety and Standards Board)의 ‘Safety Risk Model Risk Profile Bulletin’은 472종의 위험사건(Hazardous Events)의

\* Corresponding Author : Kwang Kyun Lim, Tel : +82-62-360-5585, E-mail : ikay@songwon.ac.kr  
Department of Railroad Management, Songwon University, 73 Songam-ro, Nam-gu, Gwangju 61756, Korea

세부 유형별, 항목별 발생빈도와 심각도, Risk Targets에 따른 상세한 위험관리 의사결정 기준을 제시함으로써, 예방적 안전관리에 만전을 기하고 있다. 국내의 산업안전보건 분야에서도 ‘4M 위험성 평가 매뉴얼’을 개발, 보급하면서 사전예방의 중요성과 의미를 강조하고, 이들을 각 현장에 적극적으로 홍보, 교육하는 등 다양한 노력을 기울이고 있다<sup>7)</sup>. 이러한 국내외의 최신 추세에 비해 철도분야에서는 위험도 관리 노력이 상대적으로 미흡한 듯하다.

특히, 철도운영기관에 현재 적용되는 위험도 평가 기준은 주로 과거에 이미 일어났던 사건들의 발생빈도와 재산피해의 심각도만을 측정요인으로 활용하는 단순하고 평면적인 수준에 머물러 있어서, 철도운영기관이 안고 있는 복잡하고 다양한 환경적, 상황적 변화를 제대로 반영하지 못하고 있으며, 이로 인해 철도안전관리의 궁극적 목표이자, 최근 해외 주요국의 대세인 ‘예방적 안전관리’에 상당히 취약한 구조적 문제점을 드러내고 있다. 이미 해외 철도분야에서는 과거의 사건 데이터를 토대로 향후 일어날 수 있는 사건의 잠재적 ‘발생가능성’을 정량적으로 산출하고, 심각도에 대해서도 재산피해 외에 인적피해, 행정피해 등 다양한 관련 요인들을 충분히 반영하는 등 상당히 과학적, 체계적 평가 기준을 개발, 적용하고 있는데<sup>8)</sup>, 이 같은 선진적인 내용과 방법들을 국내 철도분야에도 하루 빨리 도입하여 정착시킬 필요가 있을 것이다.

이러한 문제점과 한계점을 극복하고 개선하기 위해, 본 연구는 국내 철도분야 중에서도 고속철도분야에 적용 가능한 새롭고 합리적인 위험도 평가 기준을 모색하고자 한다. 고속철도는 철도분야에서도 첨단 기술이 집약된 분야인 데다가, 미래사회의 핵심 교통 수단으로서, 향후 그 활용도가 지속적으로 증가할 것으로 예상되기 때문에, 더욱더 예방적 안전관리가 절실하게 필요하다고 생각된다. 그럼에도 불구하고 국내에는 고속철도에 특화된 예방적 안전관리체계나 위험도 평가 기준이 사실상 전무하기 때문에, 일반·도시철도와는 운행구조나 방식, 관련기술, 시스템 등이 상당히 다른 고속철도에 대해서도 일반·도시철도의 위험도 평가 기준이 현재 대안 없이 동일하게 적용되고 있는 실정이다. 더욱이 그 일반적인 위험도 평가 기준조차도 해외의 최신 위험도 평가 기준과 비교해 보면 평면적, 단편적인 수준에 불과하기 때문에, 이에 대한 전면적인 검토와 보완, 개선, 수정 작업이 강력하게 요구된다.

이러한 문제의식 하에, 본 연구는 수서고속철도와 관련된 그 간에 축적된 운행, 운영 데이터들을 토대로 ‘고속철도에 특화된’ 보다 ‘진화·전문화’된 위험도

평가 기준 구축을 위한 합리적인 방향성과 방법론을 탐색해 보고자 한다. 본 연구가 지향하는 위험도 평가 기준의 목표는 사후처방이 아닌, 예방적 안전관리이며, 이를 위해 과거의 위험사건들의 ‘발생빈도’ 대신, 미래의 잠재적 위험사건들의 ‘발생가능성’을 정량화·수치화하는 방법을 모색하고, ‘심각도’에 대해서도 재산피해뿐 아니라, 인적피해, 시간손실 등 보다 많은 요인들을 다각적, 다면적으로 반영하여 정량화·수치화하는 방법을 찾아보고자 한다. 이러한 작업을 통해 본 연구는 고속철도의 예방적 안전관리에 최적화된 새롭고 유효적절하며 미래 지향적인 위험도 판단 기준 구축을 위한 합리적인 방법론, 발전 방향성과 이론적 시사점을 제시하고자 한다.

## 2. 선행 연구 검토

철도분야의 위험도 관리에 대한 그 간의 국내 선행 연구들을 살펴보면, 철도운행과 신호, 차량관리, 철도건설 등 다양한 영역에서 수행되는 철도 위험도 평가의 개념과 효과에 대한 연구, 위험도 평가 적용 현황에 관한 연구, 현행 철도안전관리시스템의 위험성 및 위험요인 분석 등이 다수를 차지하는 반면, 위험도 평가 기준의 세부내용이나 구성요소 등에 대한 분석적 연구는 찾아보기 힘들다.

우선 정의진, 이종우, 김종기, 신덕호, 김양모는 철도 신호시스템의 안전성을 확보하기 위한 인증체계 및 인증시스템의 위험도 평가 방법을 제시하였다<sup>9)</sup>. 이 연구는 철도신호시스템의 안정성을 향상시키기 위한 보완책과 위험도 평가 방법의 개선 필요성을 제안했지만, 고찰·분석의 범위가 철도신호분야로만 국한된 점, 위험도 평가의 개선 방안도 보다 철저한 운영과 관리 등 실천적인 부분에만 집중되고, 위험도 평가에 대한 기술적, 개념적 분석은 부족한 점 등에서 일정한 한계를 지닌다고 볼 수 있다.

다음으로 왕종배, 박찬우, 박주남은 국내외 철도사고와 운행장애, 안전규정 등에 관련된 자료 분석을 통해 철도사고의 유형을 분류하고, 분류·분석 과정에서 도출된 철도사고 위험항목(Hazard Log)들을 기준으로 기본위험분석(PHA)을 수행하였다<sup>10)</sup>. 이 연구는 국내 철도사고의 전체 유형분류를 시도하고, 그를 토대로 철도분야의 전반적인 위험분석을 시도한 점에서 학술적 의의를 지니지만, 위험도 분석이 철도분야의 현황 파악에 가까운 점, 위험도 평가 기준에 대한 이론적, 방법론적 분석은 시도되지 않은 점 등을 한계점으로 지적할 수 있다.

김영상, 맹희영, 왕종배는 국내 철도분야에 적용 가

능한 위험도 허용 기준의 개념을 정성적, 정량적으로 구분해 설명하고, 해외의 일반산업과 철도분야에서 적용하고 있는 위험도 허용 기준을 사례 중심으로 제시하였다<sup>11)</sup>. 이 연구는 국내에서는 거의 최초로 철도분야 위험도 평가 기준에 대한 본격적인 개념 소개, 정리와 함께, 해외의 위험도 기준의 연구 동향 등을 정리·소개함으로써, 철도분야의 위험도 평가 기준에 대한 이론적, 인식론적 토대를 제공하였다.

다음으로 박찬우, 김민수, 왕중배, 최돈범은 국내 철도분야의 과거 위험사고 사례들을 체계적으로 분석하고, 이를 토대로 사건의 발생빈도를 결정하기 위한 사고발생 시나리오 모델과 피해 심각도를 산정하기 위한 사고 시나리오 모델을 각각 구축하였다<sup>12)</sup>. 이 연구는 국내 철도분야에 적용 가능한 위험도 평가 모델을 거의 최초로 구축·모색한 연구로서 학술적 의의를 지니지만, 위험도 산출 기준이 되는 변수들을 과거 사건의 발생빈도와 재산피해 심각도로만 한정된 문제점을 보여주었다. 본 연구는 이를 개선하면서 해외의 최신 동향들을 수용·접목함으로써, 고속철도의 예방적 안전관리에 최적화된 위험도 평가 기준의 새로운 방법론과 방향성을 탐색하고자 한다.

김상암은 국내 실정에 맞는 위험도 기반의 안전관리체계 구성을 위해 SE 기능분석 방법인 아키텍처링을 적용하여 국가 철도안전관리시스템을 제시하였다<sup>13)</sup>. 이 연구는 위험도 평가 기준의 실제 개발 사례를 제시한 면에서 이론적, 실무적으로 의미를 지니지만, 산출 요인들에 대한 기술적, 정량적 분석에서는 다소 미흡한 측면을 보여준다.

한편, 정호진, 이재천은 철도, 항공, 해양 등 다양한 산업분야의 안전관리를 위한 출발점이자 핵심 절차인 위험원 분석단계에서 모델링 기법을 활용하는 방법을 탐색하였고, 그를 통해 안전관리 현장에서 활용 가능한 위험원을 보다 효과적으로 도출함으로써, 위험도 기준 수립의 이론적 토대를 구축하였다<sup>14)</sup>. 본 연구와는 방향성이 다르지만, 이 연구의 위험원 분석 방법 등은 위험관련 요인들을 분석하고 산출하는 과정에서 간접참고자료로 활용할 수 있다.

이상과 같은 국내 선행연구들에 대한 검토를 통해, 철도분야의 위험도에 관한 연구는 위험도의 개념 소개 및 정리, 위험도 관리시스템의 현황과약, 철도 현장에 산재하는 다양한 위험요인에 대한 통계적 분석과 정리, 관리적·실천적 측면의 개선방안 등에 대한 연구가 주류를 이루는 상태이고, 위험도 평가 기준에 대한 이론적 검토나 새로운 기준 정립을 위한 기술적, 분석적 연구는 부족한 상태임을 확인할 수 있었다. 이에 본 연구는 해외의 최신 위험도 평가 기준 등을 참조하면서, 고

속철도의 예방적 안전관리를 위한 보다 새롭고 합리적인 위험도 평가 기준을 모색해 보겠다.

### 3. 고속철도의 허용 위험도 관리 기준 고찰

#### 3.1 허용 위험 기준의 개념

합리적인 철도 위험도 평가 및 관리를 위해서는 적절한 위험도 관리 기준을 마련해야 한다. 특히 이미 발생한 사고에 대한 사후 분석과 재발방지라는 구태의 연하고 수동적인 방식으로부터 벗어나서, 철도사고를 유발할 수 있는 위험 요인을 미리 찾아내어 상시 점검함으로써 안전사고를 철저히 예방하려는 능동적, 미래지향적 철도안전관리체계를 정착시키기 위해서는 잠재된 철도 위험도를 사전에 판단·색출하여 필요한 예방 조치를 수행하는 데 유효한 지침이 되는 ‘허용 위험 기준(Risk Acceptance Criteria)’을 수립·정착시킬 필요가 있다. 허용 위험 기준은 위험도 평가에서 가장 마지막 단계에 도출되는 의사결정 사항으로서, 영국 RSSB의 위험도 평가 절차에서는 “Is risk ALARP(As low as reasonably practicable)”로 표현되고 있다. 다른 교통수단과 산업분야에서도 유사한 개념을 지닌 다양한 용어들을 사용하는데, 이를 정리해 보면 Table 1과 같다.

Table 1. Terms related to acceptable risk level per industries

| Field                             | Terms                    |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Aviation transport                | Target level of safety   |
| Road transport                    | Safety targets           |
| Road transport of dangerous goods | Risk criteria            |
| Rail transport                    | Risk acceptance criteria |
| Nuclear industry                  | Dose limits              |
| Onshore process industry          | Risk criteria            |

#### 3.2 허용 위험도 판단 방법론

##### 3.2.1 Risk Matrix Criteria

이와 관련하여, 본 연구의 목표인 고속철도 분야에 적용 가능한 과학적인 허용 위험도 평가 기준을 정립하는데 참고할 만한 이론적 시사점을 얻기 위해, 기존에 도입·적용되고 있는 3종의 허용 위험 기준, 즉 Risk Matrix Criteria, Individual Risk Criteria, Societal Risk Criteria 등에 대해 살펴보겠다. 우선, ‘Risk Matrix Criteria’는 위험사건이나 위험활동의 발생빈도와 심각도를 합산하는 방식을 통해 위험도를 평가하는 방식으로서, 위험사건의 정확한 빈도와 그에 따른 심각성의 정도를 객관적으로 정량화하기 어려운 경우에 활용되는 방법이다. Risk Matrix Criteria는 사건 발생빈도를 1~6등급으로, 심각도를 1~7등급으로 분류한 후, 발생빈도를 행으로 하고 심각도를 열로 하는

| Frequency description                                |                   |         | Improbable    | Remote       | Occasional  | Probable    | Frequent     | Common       |
|--|-------------------|---------|---------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Mid-point estimate frequency                         |                   |         | 1 in 100 yrs  | 1 in 20 yrs  | 1 in 4 yrs  | 1 in 9 mths | 1 in 2 mths  | 1 in 12 days |
| Approximate value events/year                        |                   |         | 0.01          | 0.05         | 0.25        | 1.25        | 6.25         | 31.25        |
| Consequence description                              | Approx FW/Event   | Ranking | 1             | 2            | 3           | 4           | 5            | 6            |
| Multiple fatalities<br>6 to 25 eq. fatalities        | 25                | 7       | 0.25<br>8     | 1.25<br>9    | 6.25<br>10  | 31.25<br>11 | 156.25<br>12 | 781.25<br>13 |
| Multiple fatalities<br>2 to 5 eq. fatalities         | 5                 | 6       | 0.05<br>7     | 0.25<br>8    | 1.25<br>9   | 6.25<br>10  | 31.25<br>11  | 156.25<br>12 |
| Multiple major/<br>single fatality                   | 1                 | 5       | 0.01<br>6     | 0.05<br>7    | 0.25<br>8   | 1.25<br>9   | 6.25<br>10   | 31.25<br>11  |
| Major injury   | 0.2<br>(1:5)      | 4       | 0.002<br>5    | 0.01<br>6    | 0.05<br>7   | 0.25<br>8   | 1.25<br>9    | 6.25<br>10   |
| More serious injury/<br>multiple minor injuries      | 0.04<br>(1:25)    | 3       | 0.0004<br>4   | 0.002<br>5   | 0.01<br>6   | 0.05<br>7   | 0.25<br>8    | 1.25<br>9    |
| Reportable minor injury/<br>Class 1 Shock/trauma     | 0.008<br>(1:125)  | 2       | 0.00008<br>3  | 0.0004<br>4  | 0.002<br>5  | 0.01<br>6   | 0.05<br>7    | 0.25<br>8    |
| Non reportable minor injury/<br>Class 2 shock trauma | 0.0016<br>(1:625) | 1       | 0.000016<br>2 | 0.00008<br>3 | 0.0004<br>4 | 0.002<br>5  | 0.01<br>6    | 0.05<br>7    |

Fig. 1. Application example of Risk Matrix Criteria method<sup>15)</sup>.

평가표를 만들고, 발생빈도와 심각도를 합산하여 평가표 속의 위치를 확인하는 방식으로 관련 사건이나 활동의 위험도 수준을 평가한다. 이 과정을 알기 쉽게 예시해보면, Fig. 1과 같다.

국내의 산업안전보건 분야에서는 Risk Matrix Criteria를 이미 활용하고 있고, 미국 국방성에서도 이 방법을 사용하고 있는데, 미국 국방성은 사건 발생빈도를 1~5등급으로 구분한 점이 구별된다. 다음 표는 Risk Matrix의 발생빈도, 상황별 위험 심각도에 대한 등급별 정의를 각각 정리한 것으로서, 이 같은 등급 기준을 기반으로 위험 등급을 종합적으로 산정하게 된다(Table 2).

Table 2. Definition of possible risk frequency

| Level | Description    | Quantitative definition                   | Qualitative definition   |
|-------|----------------|---|--|
| A     | Frequently (F) | $x > 1 \times 10^{-1}$                    | This can happen frequently, Ongoing experience with objects      |
| B     | Often(P)       | $1 \times 10^{-1} > x > 1 \times 10^{-2}$ | Once within the lifetime, Frequently in objects                  |
| C     | Sometimes (R)  | $1 \times 10^{-2} > x > 1 \times 10^{-3}$ | Occurs only once in its lifetime, Multiple occurrences in object |
| D     | Rarely (R)     | $1 \times 10^{-3} > x > 1 \times 10^{-6}$ | Rareness of likelihood of occurrence within lifetime             |
| E     | Little (I)     | $1 \times 10^{-6} > x$                    | Almost no chance, Occurrence but possibility                     |

### 3.2.2 Individual Risk Criteria

다음으로, Individual Risk Criteria는 ‘Individual’, 즉 사람을 중심으로 허용 가능한 위험 수준을 평가·결정하는 방식이다. 여기에서 ‘Individual’은 특정 산업분야나 교통분야에 직접 연관된 종사자, 혹은 관련자들을 의미

하는데, 철도분야에서는 여객, 공중, 직원(승무원, 기관사, 관리 직원 등)들이 이에 해당한다. 이런 의미에서 Individual Risk Criteria는 위험 활동이나 사건을 중심으로 위험수준을 평가·결정하는 Risk Matrix Criteria와 구별된다(Fig. 2).

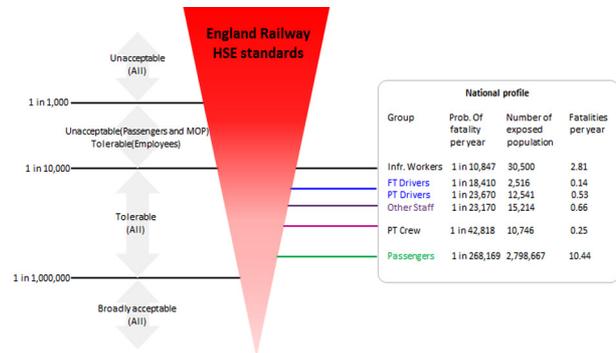


Fig. 2. HSE Individual Risk Targets(England, 2011)<sup>16)</sup>.

Table 3. Various overseas standards of Individual Risk Criteria<sup>17)</sup>

| Field of industry        | Country     | Not acceptable individual risk         | Ignorable individual risk |
|--------------------------|-------------|--|---------------------------|
| Airports                 | England     | $10^{-4}$ (Public)                     | $10^{-5}$                 |
| Road danger transport    | England     | $10^{-3}$ (worker), $10^{-4}$ (Public) | $10^{-5}$                 |
| Railway                  | England     | $10^{-3}$ (worker), $10^{-4}$ (Public) | $10^{-5}$                 |
| Nuclear power generation | England     | $10^{-3}$ (worker), $10^{-4}$ (Public) | $10^{-5}$                 |
| Marine oil gas drilling  | England     | $10^{-3}$ (worker)                     | -                         |
| Ocean transport          | England     | $10^{-3}$ (worker), $10^{-4}$ (Public) | $10^{-5}$                 |
|                          | Netherlands | $10^{-6}$ (worker)                     | -                         |
|                          | Finland     | $10^{-5}$ (worker)                     | -                         |
|                          | Hongkong    | $10^{-5}$ (worker)                     | -                         |

현재 Individual Risk Criteria를 적용하는 산업분야는 Table 3과 같다.

3.2.3 Societal Risk Criteria

다음으로 ‘Societal Risk Criteria’, 즉 사회적 위험 기준은 사망자 수를 기준으로 위험 수준을 평가·결정하는 방식이다. 이 방식은 사망자수(N, number of fatalities)를 X축으로 하고, 해당 사망자수별 발생빈도(F, frequency of n or more fatalities)를 Y축으로 하여 그래프를 만들고, 여기에 각각의 정보를 입력·표시한 F-N 그래프를 통해 위험수준을 나타내는 방식이다. F-N 그래프를 활용하기 위해서는 특정 X지점(사상자수)에서 사회적으로 허용 불가능한 빈도와 허용 가능한 빈도 및 기울기를 정하여야 한다(Fig. 3).

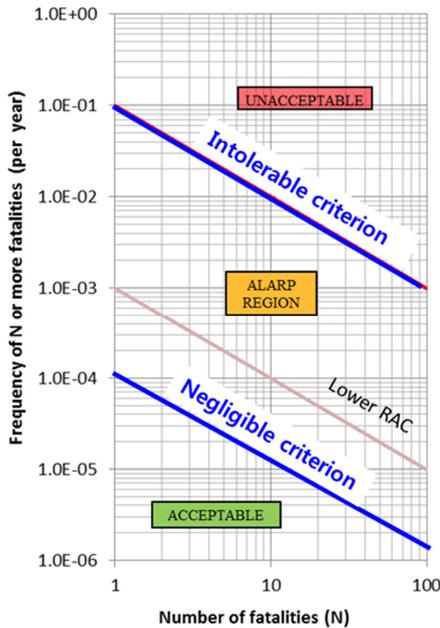


Fig. 3. Example of F-N curve.

Table 4는 해외의 다양한 산업분야에서 상용되는 Societal Risk Criteria의 적용 기준을 정리한 것이다.

지금까지 타당성과 신뢰성이 어느 정도 검증된 3종의 위험도 평가방법에 대해 살펴보았는데, 해외에서는 이들 3종의 평가방법을 각 산업분야, 관련 환경, 사건 상황, 사건규모 등에 맞게 다양하게 조합·응용하고, 여기에 사고에 관련된 물적, 인적 요소와 각종 세부 변수들까지를 세밀하게 고려하면서 보다 합리적, 효율적인 위험도 기준을 산출·적용하고자 끊임없이 노력하고 있다. 그러나 국내의 철도운영기관은 모두 Risk Matrix Criteria만을 적용하도록 규정하고 있어서, 해외의 보편적인 추세와도 유리될 뿐 아니라, 위험 평가의

Table 4. Various overseas standards of Societal Risk Criteria<sup>18)</sup>

| Field of industry     | Country     | Not acceptable individual risk | Ignorable individual risk |
|-----------------------|-------------|--------------------------------|---------------------------|
| Road danger transport | England     | 0.1/N                          | 10-4/N                    |
|                       | Swiss       | 10-3/N <sup>2</sup>            | 10-5/N <sup>2</sup>       |
| Road tunnel           | Australia   | -                              | 0.1L0.5/N <sup>2</sup>    |
|                       | Czech       | 0.1/N                          | 10-4/N                    |
|                       | Denmark     | 0.4/N <sup>2</sup>             | 0.004/N <sup>2</sup>      |
|                       | Germany     | -                              | 0.01L/N <sup>2</sup>      |
|                       | Italy       | 0.1/N                          | 10-3/N                    |
|                       | Netherlands | -                              | 0.1/N <sup>2</sup>        |
| Ocean transport       | Netherlands | 10-3/N <sup>2</sup>            | -                         |
|                       | Finland     | 10-2/N <sup>2</sup>            | -                         |
|                       | Hongkong    | 10-3/N                         | 10-5/N                    |

N : Number of deaths , L : Length of Tunnel(km)

적절성, 타당성 면에서 문제가 될 수 있다.

이상과 같은 국내 철도분야의 위험도 평가 기준의 근본적인 한계점과 문제점을 인식하면서, 본 연구는 미래의 핵심 교통수단으로서 국가적, 국제적 활용도가 계속 증가할 것으로 예상되는 고속철도에 전문적으로 적용 가능한 새로운 위험도 평가 기준 정립을 위한 방향성과 고려 사항, 이론적 시사점 등을 모색해 보고자 한다.

3.3 철도 사고 비용 추정 방법

3.3.1 사고 비용 추정 이론

한편, 위험도 평가 기준에서 중요하게 고려되어야 할 요소 중 하나가 사고관련 비용이다. 철도사고로 인한 비용손실은 크게 인적손실과 재산손실로 구분된다. 재산손실은 과거의 사고기록과 현재의 시장 시세 등을 토대로 실제 파손된 재산유형별 손실 금액을 추정하면 되므로, 비교적 용이하고 명료하게 추정할 수 있다. 이에 비해 인적손실은 사고로 인해 실제 발생한 비용손실(의료비, 보상비 등)과 잠재적인 비용손실(사회적 생산성 손실 비용, 잠재적인 기여도 손실 등) 등으로 구성되기 때문에, 복잡적이고 다양한 상황들을 고려해야 한다.

3.3.2 철도사고 비용 추정 사례

그 동안 한국교통연구원은 철도분야의 사망자에 대한 인적손실 비용추정 과정에서 1인당 실제로 발생한 생산손실 비용만을 중점적으로 적용해 왔고, 잠재적 손실 비용에 대해서는 고려하지 않았다. 따라서 향후에는 잠재적 손실비용에 대한 추정 기준도 보완해야 할 필요가 있다. 한편, 철도사고로 인한 인적 손실비용

Table 5. Railway accident medical cost(2012)<sup>9)</sup>

| Division       | Number | Total medical cost (thousand won) | Medical cost per accidents (thousand won) |
|----------------|--------|-----------------------------------|---|
| Death          | 34     | 385,725                           | 11,345 (1.00)                             |
| Serious injury | 77     | 1,134,900                         | 14,739 (1.30)                             |
| Light accident | 41     | 62,408                            | 1,522 (0.13)                              |
| Total          | 152    | 1,583,033                         | 10,415                                    |

을 토대로 사고의 ‘심각도’를 산출하기 위해서는 사망자, 중상자, 경상자 등으로 구분하여 비용을 좀 더 면밀하게 산출할 필요가 있다.

철도사고의 유형별 의료비용을 살펴보면, 사망사고는 사고 1건당 평균 의료비용이 1,134.5만원, 중상사고는 1건당 평균 1,473.9만원, 경상사고는 152.2만원으로서, 사고 1건당 의료비용은 중상사고, 사망사고, 경상사고의 순서로 높게 나타났으며, 중상사고의 1건당 의료비용은 경상 사고보다 9.7배나 되는 것으로 분석되었다(Table 5).

한편, 재산·인적 손실 비용과 함께 철도사고로 인해 발생하는 행정비용도 간과할 수 없는 중요한 문제인데, 행정비용에 대한 조사는 한국철도공사로만 대상을 한정하여 시간당 인건비와 동원 인력수 등을 기준으로 Table 6과 같이 추산하였다. 사망사고의 행정비용은 1건당 평균 998.1만원, 중상사고는 1건당 341만원, 경상사고는 199.6만원으로서, 사고 1건당 행정비용은 사망사고, 중상사고, 경상사고의 순서로 높게 나타났다. 이는 앞에서 살펴본 의료비용과는 다른 결과임을 알 수 있다.

Table 6. Railway accident administrative cost(2012)

| Human Injury     | Number | Administrative | Composition ratio | Cost per incident (thousand won) |
|------------------|--------|----------------|-------------------|----------------------------------|
| Death            | 34     | 339,352        | 27.2              | 9,981 (1.00)                     |
| Serious injury   | 77     | 262,573        | 21.1              | 3,410 (0.34)                     |
| Current accident | 41     | 81,838         | 6.6               | 1,996 (0.20)                     |
| Total            | 152    | 683,763        | 54.9              | 15,387                           |

이상의 자료들을 토대로 철도사고로 인한 인적피해 비용을 종합해 보면, Table 7과 같이 정리할 수 있다.

Table 7. Personal injuries cost of domestic railway sector(2012)

| Human injury                       | Production loss cost | Medical cost | Total (thousand won) | Ratio |
|------------------------------------|----------------------|--------------|----------------------|-------|
| Death                              | 260,529              | 11,345       | 271,874              | 1.000 |
| Serious injury<br>Current accident | 17,570               | 10,146       | 27,716               | 0.102 |

지금까지 철도사고로 인해 발생할 수 있는 비용 손실 문제를 인적손실 비용과 행정비용 등을 중심으로 살펴보았는데, 이런 요소들도 그 동안 국내 철도분야의 위험도 평가 기준에서는 제대로 반영되거나 고려되지 못하였다. 따라서 고속철도의 위험도 평가를 위한 새로운 기준을 마련하고자 할 경우에는 이처럼 기존에 간과된 요인들까지를 다면적, 다각적으로 반영한 보다 종합적, 다원적, 포괄적인 평가 기준을 마련할 필요가 있다. 이런 문제들을 포함하여 보다 진화·전문화되면서도 고속철도 분야에 특화된 위험도 평가 기준을 구축하기 위한 합리적 방법론을 이하에서 모색해 보겠다.

#### 4. 고속철도 위험도의 발생 가능성과

##### 심각도 기준 고찰

이상과 같은 문제의식과 목표 하에 본 연구는 고속철도 분야에 특화된 전문적이고 정확한 허용 위험도 평가 기준을 이론적으로 고찰하고자 한다. 기존에 국내 철도분야에서 활용된 위험도 평가 기준은 Risk Matrix 방법에 의거한 것으로, Risk Matrix의 양대 변수인 ‘발생빈도’와 ‘심각도’만으로 허용 위험도를 평가해 왔으며, 그 중 발생빈도는 ‘과거에 사건이 실제 발생한 시간적 주기’만을, 심각도는 ‘재산손실의 심각도’만을 각각 고려하였을 뿐이다. 그러나 앞서서도 고찰한 것처럼, 철도사고로 인한 비용손실은 재산손실, 인적손실, 시간손실 등 다양한 요인들로 구성되며, 인적비용은 다시 실제 비용과 잠재적 비용으로 세분되는 등 상당히 복합적, 다면적인 특성을 보여준다.

그 간의 국내 철도분야의 위험도 평가 기준은 이 같은 다원적, 다면적 요인들을 간과한 해 오로지 재산손실에만 초점을 맞춰서 평가되어 왔는데, 이를 개선·쇄신하면서 철도현장의 변화와 흐름을 보다 유연하고 능동적으로 반영할 수 있는 평가 기준을 마련하기 위해서는 다양한 비용 산출 요인 및 기타 복수의 변수들을 가능한 한 종합적으로 고려해야 할 것이다. 심각도 뿐만 아니라, Risk Matrix의 또 다른 축인 발생빈도에 대해서도 지금까지보다 더욱 다양한 요인들을 균형적, 다면적으로 고려할 필요가 있다. 이에 본 연구는 ‘발생빈도’ 대신 ‘발생가능성’을 기준 변수로 고려하면서 그 하위 측정 요인으로는 열차운행거리, 열차운행시간 등을 새롭게 활용하고자 하며, ‘심각도’에 대해서도 재산피해 뿐 아니라 인명피해, 시간손실 등 복수의 하위 측정 요인들을 추가로 활용함으로써, 보다 종합적, 합리적인 위험도 평가 기준의 방향성을 마련할 것이다(Fig. 4). 이를 통해 Risk Matrix 방법론의 큰 틀을 유지하되,

| Possibility  | Consequence  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Train operating time</li> <li>• Train operating distance</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Loss of life</li> <li>• Property loss</li> <li>• Time loss</li> </ul> |

Fig. 4. Railway risk management standard concept

보다 발전적, 진화적인 적용·응용 방안을 구축하고자 한다.

#### 4.1 철도운영 규모를 고려한 발생 가능성

본 연구가 새로운 측정·평가 요인으로 채택한 ‘발생가능성’은 과거에 사건이 실제로 발생하지는 않았지만, 오래 축적된 경험이나 통계, 전문가의 판단, 관련자료, 유사사례 등 다양한 근거들을 토대로 예상되는 ‘단위 시간당 특정 위험 사건이 발생할 수 있는 잠재성’을 의미한다. 이에 비해 ‘발생빈도’는 최소 5년 이상의 과거 철도운영 실적자료들을 토대로 도출된 ‘단위 시간당 특정 위험사건이 1회 이상 발생한 실제 주기’를 뜻한다. 따라서 ‘발생빈도’는 과거의 실제 자료들을 근거로 산출된 사건발생의 시간적 주기, 혹은 간격이고, ‘발생가능성’은 과거 자료가 없는 상태에서 특정 위험사건이나 위험요인의 잠정적인 발생가능성, 혹은 확률을 의미한다.

그 동안 영국 RSSB 및 국내 철도운영기관은 과거의 실제 사건 발생빈도, 혹은 연간 총 사건 발생 건수와 사상자 수 등을 기준으로 연도별 위험도 값의 변화를 산출해 왔다. 이로 인해 철도분야의 중요 변수인 열차운행거리, 열차운행시간 등은 위험도 평가에 반영되지 못하였다. 이처럼 철도운영의 세부 특성을 배제한 산출방식은 철도운영규모의 기간별 가감 등과 같은 상황적, 환경적 변화를 반영할 수 없다는 중대한 단점이 있기 때문에, 철도운영규모를 반영한 ‘특정 단위당 발생가능성’이라는 새로운 기준의 적용이 필요하다고 생각된다.

열차의 실제 수송량을 표시하는 중요 지표인 열차운행거리, 열차운행시간 등을 새로운 측정 변수로 활용할 경우, 거리나 시간의 장단에 따라 사건 발생가능성이 변화할 수 있는 구조를 유기적으로 반영할 수 있다는 장점을 지니게 된다. 즉, 특정 기간(주간, 월간, 연간 등) 동안의 위험사건 발생빈도를 같은 기간 운행된 전체 열차들의 운행거리, 혹은 운행시간별로 나눔으로써 보다 유효하고 실질적인 ‘사건 발생가능성’을 산출할 수 있다. 이런 방식은 이미 항공분야에서 적용되고 있는데, Table 8에 보이는 것처럼 기간별 위험 발생빈도를 전체 비행 시간으로 나누어 산출한 5등급의 ‘사건

Table 8. Classification of possible incidents applicable to aviation

| Category                        | Explanation  |  |
|---------------------------------|--|--|
| Very high (Frequent)            | Per flight hour 1~10 <sup>-4</sup>                 | Occurs on a weekly basis (occur frequently)                            |
| High (Occasional)               | Per flight hour 10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-5</sup> | Occurs on a monthly basis (light obstacle frequency)                   |
| Usually (Remote)                | Per flight hour 10 <sup>-5</sup> ~10 <sup>-6</sup> | Occurs on an yearly basis (obstacle frequency)                         |
| Low (Improbable)                | Per flight hour 10 <sup>-6</sup> ~10 <sup>-7</sup> | Occurs on 10 years basis (near miss frequency)                         |
| Very low (Extremely improbable) | Per flight hour 10 <sup>-7</sup> under             | Occurs under one-time between 10-year and 100-year(accident frequency) |

발생가능성’을 위험도 기준으로 활용하고 있다. Table 8의 세부 수치들은 항공안전의무보고를 통해 수집된 데이터를 바탕으로 산정된 값으로, 관제 SRM 기준 국내 연간 비행시간(2010년 기준, 771,451시간)을 기준으로 산출되었다.

이에 본 연구는 항공분야를 통해 보다 유효하고 신뢰성이 높은 것으로 판명된 측정요인인 ‘발생가능성’을 고속철도 분야에도 적용하고자 한다. 아울러 발생가능성을 산출하는 데 중요한 요인이 되는 기간별 열차운행시간과 관련해서는 아래와 같은 자료들을 활용하여 연간 열차운행 총 시간인 92,043 hr/year를 산출하였다(Table 9).

Table 9. Total train hours per year(Suseo High-Speed Railway)

| Train operating distance (1000 km)                        | 16.12        | 17.1  | 2                 | 3     | 4      | 5     | 6                | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12  | Total ① |
|---|--------------|-------|-------------------|-------|--------|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|---------|
|   | 1,031        | 1,390 | 1,255             | 1,390 | 1,344  | 1,388 | 1,344            | 1,388 | 1,388 | 1,344 | 1,388 | 1,362 | 403 | 16,418  |
| Section   | Distance(km) |       | Average hours(hr) |       | hr/km  |       | Average(hr/km) ② |       |       |       |       |       |     |         |
| Suseo-Busan   | 399.9        |       | 2hours 13min      |       | 0.0055 |       | 0.0057           |       |       |       |       |       |     |         |
| Suseo-Mokpo   | 356.3        |       | 2hours 7min       |       | 0.0059 |       |                  |       |       |       |       |       |     |         |
| Yearly total train operating hours (①×②) = 92,043 hr/year |              |       |                   |       |        |       |                  |       |       |       |       |       |     |         |

위와 같이 산출된 연간 열차운행 총 시간을 활용하여 열차운행 시간당 사건 발생가능성을 계산하는 식을 정리하면, 다음과 같다.

$$\text{열차 운행 시간당 발생가능성} = \frac{\text{연간 발생빈도(연간 발생건수)}}{\text{연간 운행 총 시간(hr/year)}}$$

위의 식을 참고하면서 열차운행시간과 발생가능성의 관계를 도식화해 보면 Fig. 5와 같다. Fig. 5를 보

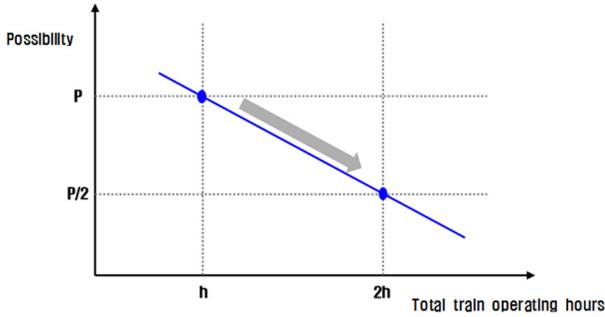


Fig. 5. Possibility change according to Total train hours change.

면, 연간 사건발생건수가 고정된 상태에서 연간 열차운행 총 시간이 늘어나게 되면 사건 발생가능성은 낮아지게 되고, 반대로 운행 총 시간이 줄어들면 사건 발생가능성은 높아지게 된다. 즉, 연간 사건발생건수가 동일하다는 전제 하에 열차운행 총 시간과 사건 발생가능성은 반비례 관계임을 알 수 있다.

이를 응용하여 본 연구는 ‘연간 열차운행 총 시간’이라는 새로운 측정요인을 도입·적용하여 보다 유의미하고 실질적인 수서고속철도의 사건 발생가능성을 산출하기 위해, 사건 발생주기를 시간의 장단에 따라 9단계(1주, 1개월, 3개월, 6개월, 1년, 3년, 5년, 10년, 100년 이내)로 나누고, 사건 발생빈도를 각 주기 당 1회로 정한 후 이를 연간 발생빈도로 환산하였고(즉, 1주 1건 발생이면 연간 52건 발생을 의미함), 위의 계산식에 따라 연간 사건 발생빈도를 연간 열차운행 총 시간으로 나눔으로써, 수서고속철도의 운영환경에 적합한 ‘열차시간당 사건 발생 가능성’을 산출하였다. 이 같은 과정을 거쳐 새롭게 산출된 ‘열차시간당 사건 발생가능성’은 과거의 사건 발생빈도에만 전적으로 의존하던 기존 위험도 평가 기준의 단점과 한계점을 극복한 실질적, 합리적 평가 기준이라고 할 수 있다(Table 10).

Table 10. Possibility standards for risk event(Suseo)

| Category | Cycle     | Number of occurrences per year | Probability of occurrence per train operating hours |           |             |
|----------|-----------|--------------------------------|---|-----------|-------------|
| 9        | Very High | 1week                          | 52  | 0.0005516 | 1/1,813     |
| 8        | -         | 1month                         | 12  | 0.0001273 | 1/7,856     |
| 7        | High      | 3months                        | 4   | 0.0000424 | 1/23,567    |
| 6        | -         | 6months                        | 2   | 0.0000212 | 1/47,134    |
| 5        | Usually   | 1year                          | 1   | 0.0000106 | 1/94,268    |
| 4        | -         | 3years                         | 0.33  | 0.0000035 | 1/282,804   |
| 3        | Low       | 5years                         | 0.2   | 0.0000021 | 1/471,340   |
| 2        | -         | 10years                        | 0.1   | 0.0000011 | 1/942,681   |
| 1        | Very Low  | within 100years                | 0.01  | 0.0000001 | 1/9,426,807 |

## 4.2 인명·재산·시간 손실을 고려한 심각도 기준

### 4.2.1 인명피해 심각도 기준

다음으로, 또 다른 위험도 평가 항목인 심각도에 대해서도 본 연구는 재산손실만을 심각도의(유일한) 측정요인으로 활용하였던 기존의 국내 위험도 평가 방식과는 구별되게, 인명손실, 재산손실, 시간손실 등 다양한 요인들을 하위 측정요인으로 두루 활용하고자 한다. 우선, 인명피해 심각도는 사망자, 중상자, 경상자 등으로 구분되는데, 철도분야에서는 이들을 ‘등가사망자 척도(Fatality Weighted Index. FWI)’로 환산하여 나타낸다<sup>20)</sup>. ‘철도안전관리체계 기술기준’에 따르면, 중상자 10명은 사망자 1명, 경상자 200명은 사망자 1명으로 환산된다. 이러한 환산기준과 함께, 현재 국내 철도운영기관들은 각각 상이한 사상자별 심각도 기준을 채택하고 있는데, 5단계인 ‘치명적’ 범주에 대해 가장 높은 기준을 적용하는 기관은 한국철도공사(5명)로서, 이는 가장 낮은 기준을 적용하는 부산교통공사(2명)와 비교하면 사망자 수가 3명이나 차이가 난다(Table 11).

Table 11. Example of human injuries severity standards

| Category | Korail     | Airport railroad seoul metro  | Busan transportation                         |                               |
|----------|------------|-------------------------------|--|-------------------------------|
| 5        | Fatal      | more than 5-death             | more than 3-death                            | more than 2-death             |
| 4        | Serious    | more than 3-death             | more than 1-death and 10 seriously wounded   | more than 1-death             |
| 3        | Capital    | more than 1-death             | more than 1 seriously and 10 lightly wounded | more than 1 seriously wounded |
| 2        | Light      | more than 1 seriously wounded | more than 2 lightly wounded                  | more than 1 lightly wounded   |
| 1        | Negligible | more than 1 lightly wounded   | more than 1 lightly wounded                  | -                             |

이상과 같은 인명피해 심각도 기준을 참조하면서, 본 연구는 아래와 같이 인명피해 심각도 기준을 8단계로 세분하고자 한다(Table 12).

Table 12. Human injuries severity standards

| Category | Human injuries | Fatalities and weighted injuries |       |
|----------|----------------|----------------------------------|-------|
| 8        | Fatal          | more than 5-death                | 5     |
| 7        | -              | more than 3-death                | 3     |
| 6        | -              | more than 1-death                | 1     |
| 5        | Serious        | more than 5 seriously wounded    | 0.5   |
| 4        | Capital        | more than 1 seriously wounded    | 0.1   |
| 3        | -              | more than 10 lightly wounded     | 0.05  |
| 2        | -              | more than 5 lightly wounded      | 0.01  |
| 1        | Negligible     | more than 1 lightly wounded      | 0.005 |

4.2.2 재산피해 심각도 기준

재산피해에 대한 심각도 기준은 아직까지 국내 철도에는 위협도 평가에서 활발하게 적용되고 있지 않다. 일부 도시철도 운영기관의 경우, 재산피해 심각도 기준을 다음과 같이 규정하여 활용하고 있지만, 세부 설정기준을 확인할 수는 없다(Table 13).

Table 13. Example of property damage severity standards (Seoul)

| Category    | 5                         | 4   | 3  | 2   | 1                   |
|-------------|---------------------------|---|--|---|---------------------|
| Explanation | More than 100 million won | More than 50 million won to 100 million won | More than 10 million won to 50 million won | More than 5 million won to 10 million won | Under 5 million won |

이와는 달리 본 연구는 인적피해 심각도도 새로운 측정변수로 적극 활용하고자 하는데, 이를 위해 앞에서 철도사고와 관련된 인적비용 손실의 세부 요인으로 살펴본 생산손실 비용, 의료비용, 행정비용 등을 모두 함께 고려할 것이다. 이들 세부 요인들의 기준수치는 한국교통연구원에서 매년 철도사고 분석비용 산출 시 제공하는 자료들을 참고하고자 한다. 인적피해 비용은 각 항목별 단위 비용을 정한 후 이를 사상자수(사망/중상/경상)로 곱하여 산출하는데, 이를 위해 한국개발연구원에서는 도로 및 철도부문의 예비타당성 조사 시 활용하는 기준을 활용하되, 일부 비용을 최신 자료로 변경하고, 의료비용과 행정비용의 적절성을 검토하여 재조정 후 적용하고<sup>21)</sup> Table 14와 15와 같다.

Table 14. Human injuries cost standards of the railway(2007) (unit : 10,000won/number)

| Division       | Production loss costs | Medical costs | Administrative costs | Total  |
|----------------|-----------------------|---------------|----------------------|--------|
| Death          | 30,695                | 666           | 70                   | 31,431 |
| Serious injury | 909                   | 424           | 1,293                | 2,626  |
| Light accident | 95                    | 9             | 253                  | 357    |

Table 15. Comparison of railway incidents medical and administrative cost yearly

| Division       | Medical costs(1,000won) |        |        | Administrative costs(1,000won) |       |       |
|----------------|-------------------------|--------|--------|--------------------------------|-------|-------|
|                | 2005                    | 2010   | 2012   | 2005                           | 2010  | 2012  |
| Death          | 4,280                   | 14,440 | 11,345 | 620                            | 1,160 | 9,981 |
| Serious injury | 5,200                   | 2,060  | 14,739 | 6,970                          | 2,160 | 3,410 |
| Light accident | 490                     | 1,950  | 1,522  | 1,700                          | 1,500 | 1,996 |

인적비용 중 생산손실 비용은 연령별 평균 수입, 활동기간, 생존확률, 경제활동 참가율 등을 측정 요인으로 활용한 Hartunian의 노동생산 손실계산식에 의거하여 산출되는데, 도로 및 철도와 상관없이 모두 동일한 값을 가지며, 이에 본 연구는 Hartunian 계산식에 국내 도로교통 분야의 2012년도 기준을 활용하여 적용하고자 한다. 도로교통 분야의 의료비용은 일반적으로 중상 의료비용이 사망 의료비용의 1.21배로 산정되며, 한국교통연구원의 2005년과 2012년 사고비용 분석자료에서도 철도사고에 따른 중상 의료비용을 사망 의료비용의 1.215배, 1.299배로 산정하고 있다. 이 같은 연구 결과를 토대로 3개 자료의 사망자-중상자-경상자 의료비용의 평균을 산출하여 적용할 것이다.

다음으로, 행정비용은 사고수습에 투입되는 직원들의 시간별 노동력의 총 비용으로서, 투입 인력 수, 투입 시간, 단위 시간당 인건비를 곱하여 산출된다. 이 경우 사고의 종류, 위치, 시간, 규모 등에 따라 투입되는 인력의 총 규모도 다양하기 때문에, 비용 편차도 그만큼 클 수밖에 없다. 한국교통연구원이 2005년, 2010년, 2012년에 각각 집계한 철도사고 행정비용 자료를 살펴보면, 중상자 처리에 투입된 행정비용이 사망자 처리 행정비용보다 각각 11.242배, 1.862배, 0.342배 등으로 산출되어 상당히 큰 편차를 보이고 있으며, 2007년의 예비타당성 조사에서는 중상자 처리 행정비용이 사망자 처리 행정비용의 18.471배로 산출되는 등 전반적으로 편차가 너무 심하기 때문에, 정확하고 일관성 있는 행정비용 기준을 정립하는 데 어려움이 있다. 이에 본 연구는 의료비용과 마찬가지로 행정비용에서도 보편적으로 중상자 관련 비용이 사망자 비용보다 더 높다는 사실을 고려하여 그 반대 결과가 나온 2012년 자료는 제외하고 2007년의 예비타당성 자료와 2005년, 2010년 자료의 평균(즉, 18.471배, 11.242배, 1.862배의 평균)을 산출하여 적용하고자 한다.

이상과 같은 국내 철도사고의 사망자, 중상자, 경상자에 대한 인적피해 사고비용을 등가척도의 개념으로 환산하면 사망자 1.0, 중상자 0.165(6.1명), 경상자 0.015(66.7명)이며, 이는 영국 RSSB의 기준인 1:10:200의 비율과는 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 이에 본 연구는 국내 실정과 다름에도 불구하고 1:10:200의 기준을 적용하였다. 이에 따라 사상자 숫자의 등가 척도 비율과 인적피해 비용비율을 서로 동일하게 유지해야 하므로, 중상자와 경상자에 대한 인적피해 비용도 사망자 비용을 3억 1,967만 1천원으로, 중상자 비용을 그 10분의 1인 3,196만 7천원, 경상자 비용은 200분의 1인 159만 8천원으로 보정하여 적용할 것이다(Table 16).

Table 16. Human injuries standard cost for railway incidents (2012)

(단위 : 천원)

| Division       | Production loss costs | Medical costs | Administrative costs | Total   | Corrected total |
|----------------|-----------------------|---------------|----------------------|---------|-----------------|
| Death          | 307,093               | 11,345        | 1,233                | 319,671 | 319,671         |
| Serious injury | 25,814                | 14,083        | 12,977               | 52,874  | 31,967          |
| Light accident | 189                   | 1,327         | 3,144                | 4,660   | 1,598           |

본 연구에서 집중 분석하고자 하는 2017년의 사고 비용은 기준연도인 2012년도에 대해 소비자 물가 지수를 적용하여 산출이 가능하며, 이에 따라 Table 17과 같이 연도별 상승률을 활용하였다.

Table 17. Consumer price index

| Year        | 2012      | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|-------------|-----------|------|------|------|------|------|
| Growth rate | Base year | 1.3% | 1.3% | 0.7% | 1.0% | 1.9% |

소비자 물가지수를 반영한 각 연도별 철도사고 인적 피해의 사망자-중상자-경상자 비용은 다음과 같으며, 이런 과정을 통해 최종 도출된 2017년도의 산출 값을 본 연구의 인명피해 비용기준에 적용하였다(Table 18).

Table 18. Human injuries cost of railway incidents(`12~`17)  
(unit : 1,000won)

| Division       | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Death          | 319,671 | 323,827 | 328,036 | 330,333 | 333,636 | 339,975 |
| Serious injury | 31,967  | 32,383  | 32,804  | 33,033  | 33,033  | 33,660  |
| Light accident | 1,598   | 1,619   | 1,640   | 1,651   | 1,651   | 1,682   |

Table 19. Standards for possible severity of property damage (Suseo)

| Category | Human Injuries | Fatalities and weighted injuries | Property damage (1,000won) |
|----------|----------------|----------------------------------|----------------------------|
| 8        | Fatal          | more than 5-death                | 5                          |
| 7        | -              | more than 3-death                | 3                          |
| 6        | -              | more than 1-death                | 1                          |
| 5        | Serious        | more than 5 seriously wounded    | 0.5                        |
| 4        | Capital        | more than 1 seriously wounded    | 0.1                        |
| 3        | -              | more than 10 lightly wounded     | 0.05                       |
| 2        | -              | more than 5 lightly wounded      | 0.01                       |
| 1        | Negligible     | more than 1 lightly wounded      | 0.005                      |

따라서 2017년도 철도사고 인적피해 사고비용을 토대로 재산피해액을 인명피해 발생심각도 기준으로 다음과 같이 환산할 수 있다. 이는 재산상의 손실은 곧 인명손실로 인한 비용 발생의 개념과 같음을 의미하며, 모든 재산상의 피해액은 인명피해로 환산이 가능함을 알 수 있다(Table 19).

4.2.3 시간 손실 심각도 기준

시간손실 심각도는 인명, 재산손실 외에 중요한 사고요인인 시간지연에 대한 심각도를 나타낸다. 철도사고나 운행장애 발생 시 지연되는 시간에는 해당열차의 지연시간뿐 아니라, 그 열차로 인해 운행 지장을 받은 다른 열차들의 지연시간도 모두 포함되어야 한다. 또한, 지연시간은 1개 열차단위의 총 지연시간과, 열차 내에 탑승한 승객들이 각각 겪은 개인별 지연시간으로도 구분된다. 이런 점을 고려하면, 시간손실도 역시 사고관련 비용손실의 중요한 부분이며, 따라서 1개 열차의 시간비용 손실뿐 아니라, 열차 내에 탑승한 각 승객들의 시간가치 손실도 전부 고려되어야 함을 알 수 있다. 그러나 현재 국내 철도운영기관에서 활용하는 시간손실 심각도 기준을 살펴보면, 단순히 해당열차에 대한 지연시간으로만 한정하여 적용하고 있기 때문에, 승객 1인당 시간손실을 전혀 고려하지 못할 뿐더러, 이로 인해 앞에서 제시한 인명, 재산피해 심각도와의 연관성도 부재한 상황이다(Table 20).

Table 20. Example of time loss standards

|                      | 5            | 4            | 3                | 2                | 1            |
|----------------------|--------------|--------------|------------------|------------------|--------------|
| Seoul metro          | more than 1h | 30min. to 1h | 20min. to 30min. | 10min. to 20min. | under 10min. |
| Busan transportation | Fatal        | Serious      | Capital          | Light            | Negligible   |
|                      | more than 1h | 30min. to 1h | 10min. to 30min. | 3min. to 10min.  | under 3min.  |

따라서 인명, 재산피해 심각도 기준과 동일한 수준의 시간손실 심각도 기준을 수립하여 함께 연계해서 적용하는 작업이 필요할 것이다. 이런 문제점을 인식하면서 본 연구는 합리적인 시간손실 비용을 산출하기 위해, 시간가치(업무, 비업무 통행), 평균승차율(열차 1대의 평균 재차 인원), 평균열차지장 대수 등의 기준을 먼저 수립하고자 한다.

개통 이후 1년간 수서고속철도에서 발생한 철도사고와 운행장애 건수는 모두 16건으로 열차지연 운행이 11건, 교통안전사상사고 2건, 교통사상사고 3건 등이다. 이런 통계 수치를 활용하면, 평균 열차지연시간은 28.64분(=315/11), 평균 지연열차 대수는 0.45대(=5/11)

이다. 한 종류의 정보에 대해 평균과 표준편차 등의 신뢰성 있는 기술통계 값을 산출하기 위해 필요한 최소한의 표본수는 30개 이상이다. 따라서 이들 두 개의 평균값을 유의미하게 산출하기 위해서는 유사한 철도운영기관들의 다른 자료들도 필요하다. 이에 본 연구는 보다 정확하고 신뢰성 있는 열차지연 현황을 조사하기 위해 철도안전종합정보시스템(한국교통안전공단)에 입

력되어 있는 최근 15년간의 모든 철도사고 기록(2001~2015년)들의 세부 현황을 검토하였다. 전체 철도운영기관에서 수집된 과거 15년간의 철도사고는 12,223건으로서, 이 중 운행장애가 46%, 철도교통사고가 40%, 철도안전사고가 14%로 나타났다. 특히, 한국철도공사에서 수집한 철도사고 건수(고속/일반/광역철도 모두 포함)가 전체 철도사고 건수의 87%를 차지하고 있다.

Table 21. Delayed accidents and operational obstacles(Suseo, 1-year)

| Type                               | Damage status |                |                |                   |                         |                                |                             |                                |
|------------------------------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
|                                    | Death         | Serious injury | Light accident | Train delay (min) | Number of delayed train | Delay compensation (10,000won) | Facility return (10,000won) | Insurance coverage (10,000won) |
| Delayed Train                      |               |                |                | 16                |                         |                                |                             |                                |
| Delayed train                      |               |                |                | 15                |                         |                                |                             |                                |
| Delayed train                      |               |                |                | 53                |                         | 517                            |                             |                                |
| Delayed train                      |               |                |                | 15                |                         |                                |                             |                                |
| Delayed train                      |               |                |                | 24.5              | 3                       | 615                            |                             |                                |
| Delayed train                      |               |                |                | 12                |                         |                                |                             |                                |
| Delayed train                      |               |                |                | 37                |                         | 458                            | 100                         |                                |
| Delayed train                      |               |                |                | 13                |                         | 454                            |                             |                                |
| Delayed train                      |               |                |                | 27                |                         | 366                            |                             |                                |
| Delayed train                      |               |                |                | 72.5              | 2                       | 313                            |                             |                                |
| Delayed train                      |               | 1              |                | 30                |                         | 396                            |                             |                                |
| Safety casualty(passenger)         |               | 1              |                |                   |                         |                                |                             |                                |
| Safety casualty(passenger)         |               | 1              |                |                   |                         |                                |                             |                                |
| Transportation casualty(passenger) |               |                | 1              |                   |                         |                                |                             |                                |
| Transportation casualty(passenger) |               | 1              |                |                   |                         |                                |                             | 335                            |
| Transportation casualty(passenger) | 1             |                |                |                   |                         |                                |                             |                                |

Table 22. Numbers of delayed trains per railway incidents (‘01~‘15)

| Company     | Railway transportation accident |         |      |          |                   |       |      | Railway safety accident |      |      | Operational obstacle |            |               |      |
|-------------|---------------------------------|---------|------|----------|-------------------|-------|------|-------------------------|------|------|----------------------|------------|---------------|------|
|             | Train accident                  |         |      | Crossing | casualty accident |       |      | Casualty accident       |      |      | Facil.               | Risk event | Delayed oper. |      |
|             | Col.                            | Derail. | Fire |          | Pass.             | Pub.  | W    | Pass.                   | Pub. | W    |                      |            |               |      |
| Air train   | ·                               | ·       | ·    | ·        | 1                 | 1     | 1    | ·                       | ·    | ·    | ·                    | ·          | 5.18          |      |
| Shinbundang | ·                               | ·       | ·    | ·        | ·                 | ·     | ·    | ·                       | ·    | ·    | ·                    | ·          | 31.17         |      |
| Busan       | 16                              | ·       | 14.5 | ·        | 16.06             | 10.22 | ·    | 18                      | ·    | ·    | ·                    | ·          | 19.04         |      |
| Daejeon     | ·                               | ·       | ·    | ·        | 4.92              | 4     | ·    | ·                       | ·    | ·    | ·                    | ·          | 8.95          |      |
| Gimhae      | ·                               | ·       | ·    | ·        | ·                 | ·     | ·    | ·                       | ·    | ·    | ·                    | ·          | 1             |      |
| Gwangju     | ·                               | ·       | ·    | ·        | 1                 | ·     | ·    | ·                       | ·    | ·    | ·                    | ·          | 10            |      |
| Incheon     | ·                               | ·       | ·    | ·        | 1.13              | ·     | ·    | ·                       | ·    | ·    | ·                    | ·          | 1.14          |      |
| Ko-rail     | H                               | ·       | ·    | 1        | 2.93              | 2.27  | 4.2  | ·                       | ·    | ·    | ·                    | ·          | 2.32          |      |
|             | G                               | 4       | 12   | 1        | 1.45              | 1.89  | 1.65 | 1.57                    | 1    | 1.25 | 2                    | 9          | 3.8           | 1.84 |
|             | M                               | ·       | 36   | 55.5     | 2                 | 3.56  | 4.02 | 1                       | 1.69 | ·    | ·                    | ·          | ·             | 6.73 |
| Seoul(1-4)  | ·                               | ·       | ·    | ·        | 1                 | 2     | 4.67 | ·                       | ·    | ·    | ·                    | ·          | 5.22          |      |
| Ling-9      | ·                               | ·       | ·    | ·        | ·                 | ·     | ·    | ·                       | ·    | ·    | ·                    | ·          | 1             |      |
| Seoul(5-8)  | ·                               | ·       | ·    | ·        | 1                 | ·     | ·    | ·                       | ·    | ·    | 10                   | ·          | 1.86          |      |
| Uijeongbu   | ·                               | ·       | ·    | ·        | ·                 | ·     | ·    | ·                       | ·    | ·    | ·                    | ·          | 1.97          |      |
| Yongin      | ·                               | ·       | ·    | ·        | ·                 | ·     | ·    | ·                       | ·    | ·    | ·                    | ·          | 4.91          |      |
| Average     | 10                              | 14.82   | 28.2 | 1.46     | 5.01              | 3.01  | 2.35 | 3.25                    | 1.25 | 2    | 9.5                  | 3.8        | 3.17          |      |

Table 23. Standards of delayed trains numbers

| Railway type         | Average of number of delayed trains |                                    |                                    |
|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                      | Total                               | Within cumulative distribution 90% | Within cumulative distribution 95% |
| High-Speed(Korail)   | 2.32                                | 1.70                               | 1.92                               |
| General railway      | 1.84                                | 1.35                               | 1.54                               |
| Metropolitan railway | 6.91                                | 3.86                               | 4.67                               |

이 자료들 중에서는 운행장애 49%, 철도교통사고 38%, 철도안전사고 13% 등으로 전체 건수들과 유사한 분포 및 비율을 보여주고 있다(Table 21).

전체 지연시간 비용을 합리적으로 산정하기 위해서는 해당열차의 지연시간뿐 아니라, 그로 인해 순연된 후속열차들의 수와 관련된 모든 열차들의 평균 재차 인원 등도 함께 파악되어야 한다. 본 연구는 순연된 열차의 수를 도출하기 위해 전체 철도사고 중 지연시간을 입력한 자료를 활용하였고, 그 결과를 정리하면 Table 22와 같다.

Table 22를 통해 최종 산출된 평균 열차지연 대수인 3.17대는 특수한 상황에서의 극단 값까지를 포함한 평균이므로, 이를 그대로 시간손실 심각도 산출에 적용할 경우 평균이 증가할 우려가 있다. 이를 보완하기 위해 본 연구는 누적 확률분포의 우측 극단에 해당되는 5~10%의 수치를 제외한 후, 나머지 90~95%의 평균값을 열차지연 대수로 산정하고자 한다.

열차의 운행환경 및 종류에 따라 열차지연 대수, 시간가치, 평균 재차 인원도 다르므로, 이러한 보정된 산출 방식은 타당성이 있다고 생각된다. 이러한 원칙에 따라 재차 산출해 보면, 수서고속철도의 전체 평균 지연열차 대수는 2.32대인데, 이 중에서 상위 10%에 해당되는 극단 값(4대)을 제외한 평균 열차지연 대수는 1.7대, 상위 5% 극단 값(6대)을 제외한 평균 열차지연 대수는 1.92대이다.

이상과 같은 보정 원칙에 따라 본 연구는 누적 분포 95% 범위 이내의 자료들을 기준으로 평균 지연열차 대수를 산출하였고, 그 결과는 Table 23과 같다.

### 5. 결론 및 고찰

지금까지 본 연구를 통해 철도의 고속화가 가속화되고 있다는 점에서 활용도가 점점 증가할 것으로 예상되는 고속철도에 특화된 전문적, 종합적인 위험도 평가 기준을 수립하기 위한 합리적인 방법론과 다양한 세부 측정요인들에 대해 검토해 보았다. 그 동안 국내 철도분야에서 활용된 위험도 평가 기준은 해외에서 주로 사용되는 3종류의 위험도 평가 방법 중 Risk Matrix

를 기본 틀로 활용한 것으로서, 이 자체로는 문제될 것이 없지만, Risk Matrix의 양대 변수인 ‘발생가능성’과 ‘심각도’를 산출하기 위한 세부 측정요인들이 지나치게 단순화된 문제점을 노출하였다. 즉, 발생빈도는 과거의 실제 사건 발생빈도만을, 심각도는 재산피해 심각도만을 고려하여 위험도를 평면적, 단편적으로 측정함으로써, 철도분야의 상황적, 환경적 변화를 제대로 반영하지 못하는 구조적 문제점들을 지니고 있었다.

이에 본 연구는 국내 철도분야에서 이미 익숙하게 정착된 Risk Matrix의 기본 틀을 유지하되, Risk Matrix의 양대 변수를 측정하는 세부 요인들을 보다 다면적, 다각적으로 정밀하게 분석·적용함으로써, 국내 철도계의 끊임없는 상황적·환경적 변화, 고속철도분야만의 특수성, 해외 철도계 및 기타 산업계의 최신 동향 등을 충분히 반영한 유연하고 합리적인 위험도 평가 기준을 마련하고자 하였다. 그를 위해 기존의 ‘발생빈도’ 대신 ‘발생가능성’을 새로운 응용 변수로 선정하고, 그 하위 측정요인으로서 열차운행시간, 열차운행거리 등을 새롭게 도입·적용하였고, 이에 합당한 자료들을 조사·수집하였다. 또 다른 변수인 ‘심각도’에 대해서도 재산피해뿐 아니라, 인적비용손실, 시간손실 등 기존에 배제되었던 보다 많은 측정요인들을 도입·적용하면서, 그에 따라 필요한 자료들을 수집하였다.

이러한 작업들을 통해 본 연구는 Risk Matrix의 양대 구성 변수인 ‘발생가능성’(발생빈도의 대안 혹은 개선안)과 ‘심각도’에 대한 신뢰도 및 타당성을 대폭 증강 시킴으로써, 일층 진화된 Risk Matrix 프로세스를 구축함과 동시에, 고속철도의 특수성을 반영한 보다 현실적, 실질적인 위험도 지표의 방향성을 새롭게 정립하는 데 어느 정도 성공했다고 생각된다. 한편으로는 위험관리에 필요한 구성요소인 발생가능성과 심각도를 산출할 때, 인력, 시설 규모 등 철도의 전반적인 운영 조건을 통하여 현실에 근접한 위험도 평가 기준을 제시할 수 없음에는 그 한계가 있기도 하다.

이 같은 본 연구의 결과는 향후 국내 철도분야의 위험도 평가 기준을 선진화, 전문화하는 데 도움이 되는 유효한 이론적, 실무적 지침을 제공할 수 있으며, 나아가 다른 산업분야의 위험도 기준 산출에도 간접적인 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다. 아울러 본 연구는 시간과 지면의 한계상 위험도 기준 산출의 방법론, 방향성 등을 중심으로 분석과 논의를 전개했는데, 이러한 본 연구의 내용을 응용·심화하여 향후 철도운영기관에 즉시 투입·적용 가능한 위험도 평가 프로그램을 개발하기 위한 후속 연구가 필요하며, 또한 실제로 개발되기를 기대한다.

**감사의 글** : 이 논문은 2018년도 송원대학교와 한국교통대학교 학술연구비의 일부 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- 1) K. O. Kwon, "A Study on the Prevention of Human Errors Accident in KNR", MS Thesis, Seoul National Univ. of Technology, Korea, 2003.
- 2) G. H. Gang, "A Risk Assessment Method Based on the Accident and Failure History of an Operator for Metropolitan", MS Thesis, Hanyang Univ., Korea, 2018.
- 3) I. S. Lee, "A Study on the Advance Plan through Comparison of Domestic and Foreign Railway Safety Management System", MS Thesis, Woosong Univ., Korea, 2017.
- 4) J. W. Lee, M. W. Kim and Y. S. Chang, "Analysis of Quantitative Safety Risk Model of Foreign Country for the Application to Korea Railway", McGraw-Hill Co, 1980.
- 5) M. Y. Park, H. J. Park, "Conceptual Study for Risk Assessment of Asset Management of Infra Structure System", Korean Society of Disaster & Security, Vol. 5, No.1, pp. 43-47, 2012.
- 6) I. T. Oh, J. G. Paeng, S. Y. Jang, "A Study on the Improvement of Domestic Rail Safety Management System through the Analysis of Safety Management Regulations and Results of the Universal Rail Safety Audit", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 11, No.3, pp. 342-348, 2008.
- 7) KOSHA, 4M Risk Assessment Technique, 2011.
- 8) International Organization for Standardization, "Risk Management-Principles and Guidelines, ISO 31000, 2009.
- 9) E. J. Joung, J. W. Lee, J. K. Kim, D. H. Shin and Y. M. Kim, "New Approach for Risk Assessment in the Railway System", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 2002, pp. 481-485, 2002.
- 10) J. B. Wang, C. W. Park and J. N. Park, "A Study on the Development of Preliminary Hazard Analysis Model for Railway System", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 2005, pp. 1-6, 2005.
- 11) Y. S. Kim, H. Y. Maeng and J. Bae. Wang, "The Study of Risk Acceptance Criteria for Railway System", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 2008, pp. 786-795, 2008.
- 12) C. W. Park, M. S. Kim, J. B. Wang, D. B. Choi, "Development of Risk Evaluation Models for Railway Casualty Accidents", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 2008, pp. 1486-1491, 2008.
- 13) S. A. Kim, "Development of Risk-based Railway Safety Management System Architecture", Journal of Korea Urban Railway Society, Vol. 1 No. 2, pp. 35-40, 2013.
- 14) H. J. Jung and J. C. Lee, "On Model-Based Hazard Analysis of Railway Systems to Acquire Functional Safety", Journal of the Korean Society for Railway, pp. 261-266, 2016.
- 15) RSSB, Guidance on the Preparation and use of Company Risk Assessment Profiles for Transport Operators, 2009.
- 16) HSE, Tolerability Limits for Risks Entailing Fatalities, Reducing Risks, Protecting People, 2001.
- 17) N. J. Duijm, "Acceptance Criteria in Denmark and the EU", Danish Ministry of the Environment, Project 1269, 2009.
- 18) P. H. Bottlelberghs, "QRA in Netherlands", Conference on Safety Cases, IBC/DNV, London, 1995.
- 19) KOTI, Calculation of Traffic Accident Cost, p. 65, 2013.
- 20) S. K. Bae and D. H. Park, "An Evaluation Model for Human Attributes of Industrial Accidents", J. Korean Soc. Saf., Vol. 18, No. 4, pp. 155-163, 2003.
- 21) OSHRI, "Analysis of Industrial Accidents in 2007", KOSHA, 2008.