고속철도 시설물의 자연재해 위험도 평가를 위한 재해위험지수 개발

Development of Disaster Risk Index for Evaluating the Natural Disaster Hazards of High-speed Railroad Facilities

박예진* · 한승룡** · 최상현***

Park, Yejin*, Han, Seungryong**, and Choi, Sanghyun***

Abstract

Although efforts to quantify natural disasters to reduce disaster risk levels have been actively made, minimal research on railway facilities has been performed in Korea to date. In this study, to quantify disaster risk levels of natural disasters, such as hurricanes and earthquakes, a disaster risk index for high-speed railway facilities is presented, and natural disaster levels of domestic high-speed railway facilities are evaluated. The disaster risk index considers the four main factors including of hazard, exposure, vulnerability, and emergency response and recovery capability, and each main factor is composed of indicators that characterize that factor. Disaster risk indices are estimated for domestic high-speed railway lines including Gyeongbu, Honam, Gyeongjeon, Jeolla, Gangneung, and SRT lines, and they are quantified for regions determined around 51 stations. The weight for each main factor and indicator is determined using Delphi and the principal component analysis method, respectively.

Key words : Disaster Risk, Disaster Risk Index, High Speed Railroad Facilities

요 지

현재까지 자연재해에 의한 피해를 정량화하고 재해위험도를 저감하기 위한 연구가 활발히 수행되어 왔으나, 국내의 경우 철도시설물에 대한 연구는 많지 않은 상황이다. 이 연구에서는 자연재해에 대한 고속철도의 재해위험도를 평가할 수 있는 재해위험지수를 개발하고 국내 고속철도 시설의 재해위험도를 평가하였다. 재해위험지수는 위험성, 노출성, 취약성, 대응복구성을 포함한 4개의 주요소를 고려하여 개발하였으며, 각 주요소의 특성은 세분화된 지표로 나타내었다. 재해위험지수는 경부선, 호남선, 경전선, 전라선, 강릉선, SRT를 포함한 국내 고속철도 선구의 특성을 고려하여 개발하였고, 51개 고속철도역사를 중심으로 설정한 권역을 기준으로 정량화하였다. 각 주요소와 지표에 대한 가중치는 각각 델파이 기법과 주성분 분석을 통하여 가중치를 산정하였다.

핵심용어 : 재해위험도, 재해위험지수, 고속철도 시설물

1. 서 론

사회의 도심화 및 밀집화가 심화됨에 따라 지진, 태풍 등 자연재해로 인한 피해는 지속적으로 증가하는 추세이며, 국내에서도 최근 경주와 포항지진을 계기로 자연재해에

대한 우려가 높아진 상황이다. 자연재해로 인한 연간 총손실액은 전세계 GDP 총액의 30% 이상에 이를 정도로 재해의 규모도 점차 대형화하고 있으며(Han, 2016), 특히 도로나 철도 등의 사회기반시설에 피해가 크게 나타나고 있는데 이는 대형사고, 장기적인 라이프라인 마비로 인한 인적·물

*정회원, 한국교통대학교 철도공학부 석사과정(E-mail: pyj3134@nate.com)

Member, Graduate Student, Department of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation

**정회원, 한국전력기술 책임연구원(E-mail: hoanung@hanmail.net)

Member, Senior Researcher, KEPCO E&C.

***교신저자, 정회원, 한국교통대학교 철도공학부 교수(Tel: +82-31-460-0564, Fax: +82-31-462-8205, E-mail: schoi@ut.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Railroad Engineering, Korea National University of Transportation

적·사회적 피해 유발과 함께 궁극적으로는 국가 발전의 저해요소로 작용할 수 있다(KEI, 2009).

대량수송성, 친환경성, 정시성, 안전성 등의 장점을 갖고 있는 철도는 고속화를 통해 여객 및 화물 수송 분담률을 높이고 있으며, 점차 국가의 중심 교통인프라로 부상하고 있다. 철도는 궤도가 부설된 선로로 열차의 시간적, 공간적 독립성을 확보하여 궤도, 토목, 전철전력, 신호제어, 차량 등 다양한 기술을 기반으로 운영되고 있으나, 다종 기술에 대한 종속성은 일부 요소기술 장애 시 운행장애 또는 사고 등의 문제를 초래할 수 있으며, 특히 지진, 태풍 등의 자연 재해에 대한 위험도를 높일 수 있다(Kim et al., 2018; Park et al., 2018). 최근 빈발하고 있는 지진 등 국내 자연재해 발생 추이와 피해 정도를 고려할 때 재해위험도 평가를 통하여 자연재해에 대한 철도의 대응성을 제고하는 것이 시급하나, 현재까지 수행된 대부분의 연구는 재해 시 개별 철도시설물 또는 철도시스템의 손상이나 피해 산정에 대한 내용이 주종이며, 다양한 철도의 위험요소를 고려하여 종합적으로 자연재해에 대한 철도시설물의 위험도를 산정할 수 있는 기법에 대한 연구는 미흡한 상황이다.

이 연구에서는 지진 및 태풍을 포함한 자연재해에 대하여 국내에 운영 중인 고속철도 시설물의 재해위험도를 평가할 수 있는 재해위험지수를 제안하였다. 고속철도에 대한 재해 위험지수는 위험성, 노출성, 취약성과 함께 대응 및 복구성도 같이 고려할 수 있도록 하였다.

2. 연구동향 및 연구내용

2.1 국내외 연구동향

국내의 경우 지역 또는 특정 시스템에 대한 재해위험도를 산정하기 위한 기법을 중심으로 지진과 태풍에 대한 연구가 주로 수행되어 왔다. NIDP (2002)는 도시 공간에서 재해와 관련된 요소들을 파악하고, 재해 시 위험요인으로 발전할 수 있는 요소들을 조사하여 방재계획상 시급히 정비해야 하거나, 방재사업을 우선적으로 실시해야 할 장소 등을 선정할 수 있는 지역위험도에 대하여 연구하였다.

Kim et al. (2005)은 위험성, 노출성 및 취약성을 고려한 잠재위험도를 이용하여 도시지역 홍수의 피해규모를 평가할 수 있는 기법을 제안하였다. Yoon et al. (2005)은 HAZUS의 방법론과 GIS 데이터베이스에 기초하여 지진 시 도시지역의 피해를 종합적으로 산정할 수 있는 기법을 제안하였다. KEI (2008), GRI (2009), SDI (2010) 및 IDI (2010)는 각각 전국 16개 시·도, 경기도, 서울시, 인천시에 대한 취약성 평가를 실시하였다. Kim and Kim (2012)은 전남 22개 시·군을 대상으로 기후변화에 대한 취약성을 평가하였다.

이들 연구는 주로 GIS에 기반하여 지역적 위험도를 종합적으로 판단할 수 있는 기법에 초점을 맞춰 진행되었다.

특정 시스템과 관련한 연구로는 Jeon et al. (2008)이 라이프라인의 지진재해 위험도 평가를 수행하였으며, Song et al. (2014)이 라이프라인 네트워크의 재해복원력과 관련한 신뢰성 해석 기법에 관한 연구를 수행한 바 있다.

해외의 경우 Davidson and Shah (1997)는 도시지역 지진 재해 위험도 산정을 위하여 지진재해에 대한 여러 요소와 지표 등을 개발하였다. Bnouar and Mimi (2002)는 재해위험, 재해위험도 및 재난관리를 조합한 재해위험도 함수를 제시하였다. Kron (2002)은 홍수위험도에 대해서 홍수와 재해위험성, 경제적 자산이나 인명의 노출성 그리고 홍수방어능력의 부족을 의미하는 취약성의 세 가지 요소들을 곱하여 홍수위험도를 제시한 바 있다.

국내에서도 재난위험도와 관련하여 대응 및 복구시스템을 포함하여 사회적, 경제적인 영향을 평가할 수 있는 기법의 적용성이 연구된 바 있다. Han (2013)은 위험성, 노출성, 취약성 및 대응·복구성을 고려한 복합재해위험지수를 제안하고, 인천광역시 8개 구를 대상으로 재해위험도를 평가하였다. Han et al. (2016)은 복합위험요소를 고려한 재해위험지수를 기반으로 도시지역의 재해위험도를 평가할 수 있는 기법을 제안하였다.

현재까지 철도시설물의 재해위험도와 관련한 국내 연구는 철도시설물에 대한 재해위험요소를 종합적으로 고려하여 재해위험도를 정량화하기 위한 연구는 미흡한 상황이며, 대부분의 연구는 자연재해에 의한 개별 철도시설물 또는 철도시스템에 대한 손상도나 피해 산정 기법이 주종을 이루고 있다. NIDP (2008)는 노반, 교량, 터널 및 설비를 포함한 철도시설물의 지진취약도함수를 제안하였다. Park et al. (2012)은 철도를 포함한 SOC 시설의 기초와 노반의 재해 위기 대응 및 복구에 대한 기술동향을 검토하고, 철도에 필요한 재해위기 대응 및 복구기술 분야의 기술 개발 필요 기술을 도출하였다. Kim (2012)은 위험성과 취약성을 기반으로 자연재해 위험도를 소개하고, 자연재해 요소별로 철도 인프라의 예방대책을 검토하였다.

2.2 재해위험지수 구성체계

철도와 같은 특정 시스템의 재해위험도 평가를 위한 모델은 지진 또는 태풍 등의 재난이 유발하는 피해에 대한 단순한 평가가 아닌 재해 발생 가능성을 고려한 재해 위험성과 재해로 인한 사회·경제적 영향 및 재해 대응 능력을 체계적으로 고려하여야 한다.

그러므로 재해위험도를 평가하기 위하여 위험요소에 의해 얼마나 피해를 입을 것인지(위험성), 위험요소에 얼마나 노출되어 있는지(노출성), 재해에 대해 얼마나 취약한지(취약성)와 대응 및 복구시스템이 얼마나 갖추어져서 그 역할을 할 수 있는지(대응·복구성)에 대한 고려를 통하여 사회적, 경제적인 영향을 평가할 수 있어야 한다. 이 연구에서는 이러한 점을 고려하여 재해위험지수를 평가하기 위한 주요

소를 위험성, 노출성, 취약성 및 대응·복구성으로 구성체계를 작성하였다.

2.2.1 지표선정기준

Rossi and Gilmartin (1980)은 사회적 지표들을 평가하고 비교할 수 있는 다양한 기준들에 대하여 제시하였으며, 지표가 갖춰야 할 요건을 다음과 같이 제시하였다. 첫째, 지표는 표현하고자하는 개념을 정확하게 반영하고 있어야 한다. 고려된 지표가 주요소를 정확하게 반영하지 못할 경우 최종적으로 산정된 재해위험도는 타당성이 결여되어 합리적인 값이 되지 않을 것이다. 둘째, 지표는 대상으로 하는 특정 지역 또는 시스템에 대하여 명확한 형태를 갖추고 있어서 신뢰할 수 있으며 상대적으로 수집이 용이한 자료를 기반으로 해야 한다. 셋째, 재해위험지수는 정량적이고 명시적인 값으로 제시되어야 하므로 지표도 객관성을 갖추고 정량적으로 결정할 수 있어야 하며, 이러한 데이터에 기반하고 있어야 한다. 넷째, 재해위험지수를 결정하기 위하여 사용되는 지표는 가능한 익숙하거나 이해가 용이한 정보를 이용하여야 하며, 가급적 직관적으로 이해 가능하여 데이터 수집 또는 처리 시 혼란이 없도록 해야 한다. 다섯째, 지표는 결정하고자 하는 재해위험지수와 직접적으로 연관되어 있어야 한다.

이 연구에서는 Rossi and Gilmartin (1980)의 연구 결과를 이용하여 지표를 선정하였다. Fig. 1은 재해위험요소를 고려한 재해위험지수의 4개의 주요소(위험성, 노출성, 취약성, 대응복구성)와 주요소를 대표하는 지표를 나타낸다.

Fig. 1. Framework of Disaster Risk Index

3. 재해위험지수

3.1 대상지역 설정

재해위험지수 개발 지역은 고속철도노선이 지나가는 지역을 대상으로 선정하였다. 고속철도의 범위는 2018년을 기준으로 경부선, 호남선, 경전선, 전라선, 강릉선, SRT 노선으로 정의하였다. 현재 고속철도의 경우 비교적 데이터가 양호하게 제시되어 있으나, 일반철도에 대한 데이터는 충분

치 않은 상황이므로 이 연구에서는 고속철도만으로 연구 범위를 한정하였다.

3.2 재해위험지수 지표자료 구축

기존 연구의 경우 보통 특정 지자체나 지역을 중심으로 재해위험지수를 산정하였으나, 철도의 경우 이러한 구분이 어렵고 선구별로 구분할 경우 다수의 선구가 중첩되는 역사가 있을 수 있어 이 연구에서는 고속철도역사를 중심으로 권역을 나누고 지표를 정량화하였다. 인구수, 가구수, 인구밀도, 중소기업 밀도, 소방공무원수, 의료인수, 병상수 등의 지표는 선로가 경유하는 지자체 현황을 이용하여 결정하였다. 역사 간 선로가 하나 이상의 지자체를 경유할 경우 선로 길이에 비례하여 지표를 산정하였다.

3.2.1 위험성

위험성은 재해위험요소에 의해 얼마나 피해를 입을 것인지를 나타낸다. H_{a1} , H_{a2} , H_{a3} 는 지반운동, H_{b1} 는 태풍(강풍), H_{c1} , H_{c2} 는 상호위험의 위험성 지표를 나타낸다.

- H_{a1} : 재현주기 500년 지진가속도
- H_{a2} : 재현주기 1,000년 지진가속도
- H_{a3} : 재현주기 2,400년 지진가속도
- H_{b1} : 설계 기본풍속
- H_{c1} : 지진구역계수
- H_{c2} : 산사태 1등급 비율

지진 발생에 의한 지반운동은 대상 시스템 또는 지역에 직접적인 손상을 입힐 수 있으며, 화재나 산사태 및 액상화 등의 2차적인 피해를 유발할 수 있어 가장 중요한 위험요소 중 하나이다. 지반운동에 대한 지표는 현재 내진설계기준(MOLIT, 2018)이 제시하고 있는 재현주기를 참고하여 500년, 1,000년 및 2,400년 지진위험지도를 사용하여 결정하였다. 태풍은 지역별 현재 설계기준(MOLIT, 2018)상에 제시되어 있는 기본풍속을 사용하여 지표를 결정하였다. 상호위험은 지반운동과 강풍(풍속)으로 인하여 상호적으로 발생하는 외부적 재해 위험을 의미한다. 상호위험과 관련한 지표는 지반운동에 기초한 지진구역계수와 산사태위험을 이용하여 작성하였다. 지진구역계수는 1997년 발표된 내진설계연구기준(II) (MOCT, 1997)에 제안되어 현재 도로교 설계기준 등에 광범위하게 적용되고 있는 지진구역계수를 지표로 선정하였다. 산사태위험 지표는 산림청 산사태정보시스템의 산사태위험지도에서 1등급위험 비율을 활용하여 작성하였다.

3.2.2 노출성

노출성은 위험요소에 얼마나 노출되어있는지를 나타낸다. 노출성에 대한 지표는 철도시설물, 인구, 경제, 사회·경제구조의 4가지 요소로 구성하였다. E_{a1} , E_{a2} , E_{a3} , E_{a4} 는

철도시설물, E_{b1} 는 인구, E_{c1} , E_{c2} , E_{c3} 는 경제, E_{d1} , E_{d2} , E_{d3} 는 사회·경제 구조의 노출성 지표를 나타낸다.

- E_{a1} : 선로길이
- E_{a2} : 교량 연장길이
- E_{a3} : 터널 연장길이
- E_{a4} : 역사 총면적
- E_{b1} : 이용객 수
- E_{c1} : 지역총생산
- E_{c2} : 지방세
- E_{c3} : 사업체 수
- E_{d1} : 인구 수
- E_{d2} : 가구 수
- E_{d3} : 철도물류량

재해로 인한 철도시설물의 피해는 산업 생산 등에 2차적인 피해를 야기할 뿐 아니라 대응 및 복구에 영향을 주게 된다. 산업 생산 등에 2차 피해를 야기할 수 있는 시설로는 도로, 철도, 도시가스, 상수도, 전기, 통신 등이 있으나, 이 연구의 범위는 고속철도에 대한 재해위험지수를 산정하는 것이므로 관련 지표는 철도선로, 교량 및 터널, 전철주, 신호기 현황 등의 고속철도 시설물만으로 한정하였다. 철도 선로 길이는 한국철도공사의 철도노선도를 이용하여 산정하였다. 전철주, 신호기 현황은 명확한 통계 자료가 부재하여 일반적인 배치간격을 고려하여 연장길이에 비례하도록 산정하였다. 철도역사의 총 면적은 정보공개포털의 청구신청을 통하여 한국철도공사에서 자료를 제공받아 산정하였다.

인구는 자연재해에 대해 가장 직접적으로 영향을 받으며, 모든 재난 관련 통계에서 가장 민감한 요소로 재해위험요소에서 중요한 지표 중 하나이다. 일반적으로 자연재해에 대한 재해위험지수 산정 시 얼마나 많은 인구가 노출되어 있는가를 감안하여 대상 지역의 유동인구, 거주인구를 포함한 인구를 지표로 나타낸다. 이 연구에서는 고속철도를 이용하는 승객수를 고려하여 노출성 지표로 선정하였다. 철도역사별 이용객 수는 철도통계연보의 역사 별 여객 승차, 하차 실적을 합산하여 산정하였다.

동일 규모의 재난이 발생하였을 때 재난에 노출되는 경제의 규모가 크면 그 피해 역시 크게 된다. 경제의 노출요소를 표현할 수 있는 지표로는 부동산 가치, 지역총생산, 사업체 수, 지방세 징수 금액 등이 있으나, 특정 지역의 경제 규모를 대표하기 위하여 주로 사용되는 지역총생산 지표가 경제를 나타내는데 가장 타당한 것으로 판단하였다. 서울시를 제외한 모든 시·군·구 자료는 국가통계포털에서 자료를 얻었고, 서울시는 서울열린데이터광장 사이트에서 자료를 얻었다. 그리고 지방세는 취득세, 등록면허세, 지방소비세, 재산세, 자동차세 등의 항목을 포함하고 있어 지역 경제의 규모를 파악하는데 편리한 지표로 사용될 수 있다. 지방세는 국가통

계포털에서 자료를 얻었다. 사업체 수 지표는 지역 총생산과 달리 각 경제주체가 개별적으로 재해에 노출된 정도를 산정한 것이다. 사업체 수는 중소기업 기본법 시행령을 참고하여 대기업, 중소기업, 소기업으로 분류하여 산정하였다. 시군구별 사업체 수는 국가통계포털 전국사업체조사를 참조하였다.

인구 구성단위의 노출도 평가를 위한 지표로 가구수를 선정하였다. 여기서 가구수는 위험요소에 노출된 인간의 주거공간을 나타낸다. 인구는 철도재해 위험에 직접적으로 노출되어있지 않으나, 자연재해로 인하여 역사 인근 주민들이 피해를 입는다면 사회·경제구조에 영향을 줄 수 있다. 가구 수와 인구는 국가통계포털에서 자료를 얻었다. 철도 물류량은 고속철도가 지진피해를 받으면, 여객의 피해와 함께 철도 물류에도 영향을 미치기 때문에 지표로 선정하였다. 철도 물류량은 철도통계연보(MOLIT et al., 2018)의 고속철도역사를 기준으로 기·종점별 화물수송실적을 참고하여 산정하였다.

3.2.3 취약성

취약성은 특정 재해로 인해 철도시설물이 얼마나 피해를 받는지를 나타낸다. 취약성을 고려하기 위한 요소는 철도시설물, 인구, 경제, 사회·경제구조 4가지 요소로 노출성과 동일하게 구성하였으나, 세부적인 지표는 재해에 취약한 부분만을 의미한다. V_{a1} , V_{a2} , V_{a3} , V_{a4} 는 철도시설물, V_{b1} 는 인구, V_{c1} 은 경제, V_{d1} , V_{d2} , V_{d3} , V_{d4} 는 사회·경제 구조의 취약성 지표를 나타낸다.

- V_{a1} : 교량 지진취약도
- V_{a2} : 터널 지진취약도
- V_{a3} : 전차선로시스템 지진취약도
- V_{a4} : 전차선로시스템 강풍취약도
- V_{b1} : 신호기 지진취약도
- V_{c1} : 취약인구 할인 금액
- V_{d1} : 소기업(중소기업) 비율
- V_{d2} : 취약인구 수
- V_{d3} : 기차 정기권 이용객 수
- V_{d4} : 인구밀도

철도시설물의 취약성은 전국에 설치되어있는 고속철도 구간 시설물에 대하여, 노반, 전철주, 신호기, 교량, 터널 지진, 태풍취약도를 고려하여 결정하였다. 교량 및 터널의 지진취약도 함수는 선행연구를 참조(NIDP, 2008)하여, 2,400년 재현주기의 지진가속도를 바탕으로 계산된 파괴가능성을 지표로 산정하였다. 시설물 중 강풍에 대하여 취약한 부분은 가공선을 포함한 전차선로시스템이다. 따라서, 전차선로시스템의 강풍취약도를 산출하여 설계 기본풍속을 기반으로 계산된 파괴가능성을 지표로 산정하였다.

고속철도를 기준으로 취약요소 인구는 해당 역사를 이용하는 취약이용객 수를 의미한다. 모든 인구가 재해에 똑같이 취약하고 긴급 상황에 동일하게 행동한다면 세부적인 분류가 필요 없으나, 상대적으로 위험 판단력이 미흡한 어린이와 노약자 인구는 별개의 취약 집단으로 고려할 필요성이 있다고 판단하였으며, 5세 이하의 영유아와 65세 이상의 노약자 인구의 비율을 지표로 설정하였다.

경제적인 부분에 대한 취약성은 소기업의 비율을 취약요소 지표로 설정하였다. 재난 발생으로 인하여 피해를 받았을 때 소기업은 대기업과 중기업에 비하여 상대적으로 재해 복구 속도와 복구를 위한 경제적인 여력이 부족할 수 있다. 중기업과 소기업을 구분하는 기준은 중소기업기본법을 준용하여 결정하였다. 참고로 현행 중소기업기본법이 제시하고 있는 중기업과 소기업의 구분 기준은 3년 평균 매출액만으로 구별하고 있으나, 현행 기준으로는 시·군·구 별로 중소기업의 상시근무인원 만을 제시하고 있는 중소기업청의 전국사업체조사 결과를 이용한 중기업과 소기업의 분류가 불가능하여 상시근무인원으로 구분하는 법 개정 이전 기준으로 산정하였다.

사회·경제구조의 취약요소 지표는 노출요소 지표와 달리, 사회·경제구조 중 취약한 부분을 의미한다. 취약요소 지표는 고속철도 정기관 이용객 수와 인구밀도, 취약인구수로 나타내었다. 인구밀도는 도시의 인적 구조가 얼마나 재해에 취약한지를 나타낸다. 인구밀도가 높을수록 재해로 인한 피해 인구가 많아지므로 이를 감안하여 지표로 선정하였다. 인구 요소에 있는 취약이용객과는 달리 인구밀도와 취약인구수는 사회경제적 구조를 대표할 수 있는 지표이다. 인구밀도와 취약인구수는 국가통계포털을 이용하여 조사하였다.

3.2.4 대응·복구성

대응·복구성은 재해의 피해를 받았을 때 얼마나 효율적으로 대응하고 복구할 수 있는지를 나타내는 주요소이다. 이 주요소는 방재계획, 유용자원, 이동성 및 접근성으로 구성하였다. R_{a1} , R_{a2} 는 방재계획, R_{b1} , R_{b2} , R_{b3} , R_{b4} , R_{b5} , R_{b6} , R_{b7} , R_{b8} 는 유용자원, R_{c1} , R_{c2} 는 이동성 및 접근성의 대응·복구성 지표를 나타낸다.

- R_{a1} : 재정능력-재정자립도
- R_{a2} : 방재성능
- R_{b1} : 역무원 수
- R_{b2} : 철도 유지보수 예산
- R_{b3} : 지역총생산
- R_{b4} : 의료인(의사, 간호사) 수
- R_{b5} : 병상 수
- R_{b6} : 소방공무원 수
- R_{b7} : 경찰공무원 수
- R_{b8} : 소방 기동장비 수

- R_{c1} : 인구밀도
- R_{c2} : 도로망 길이

방재계획은 지방 정부의 지진에 대한 대비 및 위험관리 능력, 복구 능력과 복구를 뒷받침 할 수 있는 경제 능력 등을 나타낸다. 재난으로 인하여 국가 안녕 및 사회질서 유지에 중대한 영향을 미치는 경우 재난 및 안전관리기본법에 의하여 특별재난지역으로 선포하고 응급 대책 및 재난구호와 복구에 필요한 행정·재정·금융·의료상의 특별 지원을 받을 수 있다. 그러나 특별재난구역으로 선포되기 이전 또는 특별재난구역으로 선포되지 못한 경우 재난에 대한 대응 및 복구는 지방정부의 역할이 크기 때문에 지방정부의 행정적인 능력이 중요하다. 또한 지방정부가 다양한 정책 수립과 실행을 통하여 재해 예방 및 저감에 행정적인 노력을 한다면 재해로 인한 인명과 재산의 손상은 저감될 수 있다. 지방정부의 재정능력은 재해 발생 시 복구와 구호에 있어 매우 중요한 사항이다. 지방정부의 재정능력이 높다면 복구와 피해 구호에 필요한 예산 배정이 용이하고 그에 따라 재해 복구의 속도가 빨라져 2차적인 피해를 최소화할 수 있다. 지방정부의 재정능력을 평가할 수 있는 지표로는 재정자립도를 선정하였다. 재정자립도는 지방정부의 전체 재원에서 자주재원의 비율을 의미하는데 재정자립도가 낮을수록 중앙정부의 예산에 의존율이 크기 때문에 재해 복구 예산의 편성 및 운용에 불리하게 작용한다. 방재계획은 2016년 국민안전처에서 실시한 자연재해에 대한 지역안전도 진단 결과의 방재성능을 이용하여 산정하였다. 방재성능은 지역의 구조적인 재해방어능력 확보 실적 18개 항목(방재성능목표 설정·공표, 관로시설·배수펌프장·저류시설 정비 실적, 하천·소하천 정비실적, 사망사망·급경사지 정비 실적, 재해위험지구 정비 실적 등)을 포함한 지수이다.

유용자원은 재해 발생 시 비상대응 및 복구를 위한 기존 가용 인력 및 장비의 보유 현황에 대한 요소이다. 재해 발생 시 기존 가용 응급복구 인력 및 장비를 통하여 복구가 즉시 이루어져 2차적인 피해를 줄일 수 있는가를 나타낸다. 인력 및 장비의 확보 여부에 따라 복구 기간을 줄일 수 있고, 충분한 인적자원 및 물자 등을 확보하여 재해현장에 신속히 투입하여 응급복구가 이루어질 수 있는가는 피해를 최소화 하는데 큰 역할을 한다. 따라서 각 지역별 인적자원 및 유용자원은 지역 총생산, 의료인 수, 병상 수를 지표로 활용하였다. 지역총생산은 국가통계포털을 활용하여 각 시군구 지역총생산에서 지역인구수로 나누어 산정하였다. 의료인 수 및 병상 수는 평상시 적정 의료인력 확보로 국민건강 증진에 기여 및 사회 안전망 확충의 척도를 나타낸다. 또한, 이는 평상시가 아닌 재해발생 시 대응 복구를 신속하게 진행할 수 있도록 하는 역할을 수행한다. 이들 정보는 국가통계포털에 제시된 시·군·구별 의료인(의사, 간호사) 수와 병상 수를 이용하여 지표를 산정하였다. 재난상황에 대한 훈련이

되어 있으며 인명 구조 및 복구에 최우선적으로 투입될 수 있는 소방공무원 수, 경찰공무원 수, 소방장비 수는 각각 소방청과 경찰청에 정보공개청구신청을 통해서 자료를 제공받았다. 소방장비 부분에서는 재난 발생 시 소방대원 및 소방장비를 이동시켜 피해를 저감시킬 수 있는 소방차 보유 현황을 지표로 설정하였다. 철도가 재해피해를 입었을 때 즉시 대응할 수 있는 역무원 수와 재해로 손상을 받은 철도시 설물을 유지·보수하기 위한 철도 유지보수 예산은 고속철도를 기준으로 지표를 산정하였다.

이동성 지표는 인구밀도와 도로망 길이를 지표로 삼아 얼마나 많은 인구가 빠른 시간 내에 대피할 수 있는지를 산정하였다. 재해 발생 시 대상지역의 이동능력을 나타내는 지표는 골든타임 내에 얼마나 많은 인구가 대피할 수 있는지를 고려해야 하므로 단순히 인구수를 사용하기 보다는 인구밀도를 사용하는 것이 타당하다. 충분한 도로망의 길이는 대피소까지의 이동성을 확보하여 주며, 대응복구를 위한 인원 및 장비가 투입될 수 있는 능력을 의미하므로 이동성 요소를 대표하는 지표로 선택하였다. 인구밀도와 도로 길이는 국가통계포털을 통해 자료를 얻었다.

3.3 가중치 산정

일반적으로 가중치는 설문지 등을 이용하는 주관적인 방법과 데이터 등에 근거한 객관적인 방법 중 한 가지를 이용하여 산정하나, 설문 대상 또는 데이터 수에 따른 편향성이 발생할 수 있으므로 상황에 따라 적절하게 선택하여 사용해야 한다. 이 연구에서는 4개 주요소에 대한 가중치는 델파이 기법을 사용하고, 39개 지표에 대한 가중치는 주성분 분석 기법을 사용하여 산정하였다.

주요소 가중치는 설문지 조사를 통해 철도전문가 60명에게 주관적인 응답을 받았다. 설문지의 가중치 값을 정리하면, 위험성 0.302, 노출성 0.206, 취약성 0.247, 대응복구성 0.245로 위험성이 가장 재해위험지수에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 노출성이 가장 영향이 적고 취약성과 대응복구성은 비슷하게 영향을 주는 것으로 나타났다.

39개 지표에 대한 가중치는 주성분 분석 기법을 이용하여 정량화하였다. Table 1은 지표 가중치 산정 결과이다.

Table 1. Weight of Indicator

Factor	Indicator	Weight
Hazard	500 year return period earthquake hazard	0.198
	1,000 year return period earthquake hazard	0.199
	2,400 year return period earthquake hazard	0.195
	design wind speed	0.113
Hazard	earthquake zone factor	0.177
	1 st grade landslide rate	0.118

Table 1. (Continued)

Factor	Indicator	Weight
Exposure	railway line length	0.125
	bridge length	0.093
	tunnel length	0.119
	railway station total area	0.121
	number of railway passengers	0.107
	gross regional domestic product	0.061
	local tax	0.080
	number of companies	0.060
	population	0.060
	number of housing units	0.060
	railway logistics	0.114
Vulnerability	seismic fragility of bridge	0.112
	seismic fragility of tunnel	0.112
	seismic fragility catenary system	0.112
	wind fragility of catenary system	0.072
	seismic fragility of railway signal	0.112
	vulnerable social group discount	0.103
	smaller business rate	0.065
	number of vulnerable social group	0.077
	number of commutation ticket	0.089
	population density	0.071
Emergency Response and Recovery capability	fiscal capacity/self-reliance	0.093
	disaster prevention performance	0.081
	station employees	0.073
	budget of railway maintenance	0.070
	gross regional domestic product	0.079
	number of medical personnel	0.093
	number of sickbed	0.092
	number of firefighters	0.095
	number of police officers	0.094
	number of firefighting mobile equipment	0.086
	population density	0.060
	road network length	0.084

3.4 재해위험지수 산정

재해위험지수는 표준화한 지표와 가중치를 이용하여 산정할 수 있다. 재해위험지수를 산정하는 식은 Eq. (1)과 같다. 참고로 Eq. (1)로 산정되는 재해위험지수는 대상 지역 또는 역사 권역들 간의 상대적인 재해위험을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{재해위험지수} &= X_H H + X_E E + X_V V + X_R R \\ H &= X_{H1} x_{H1} + X_{H2} x_{H2} + X_{H3} x_{H3} + X_{H4} x_{H4} \cdots \end{aligned}$$

$$E = X_{E1}x_{E1} + X_{E2}x_{E2} + X_{E3}x_{E3} + X_{E4}x_{E4} \cdots$$

$$V = X_{V1}x_{V1} + X_{V2}x_{V2} + X_{V3}x_{V3} + X_{V4}x_{V4} \cdots$$

$$R = X_{R1}x_{R1} + X_{R2}x_{R2} + X_{R3}x_{R3} + X_{R4}x_{R4} \cdots$$

여기서, H = 위험성,
 E = 노출성,
 V = 취약성,
 R = 대응복구성,
 X_i = 주요소 가중치,
 X_{ij} = 지표 가중치,
 x_i = 표준화된 지표값

4. 재해위험도

(1) 전국 51개 고속철도 역사를 중심으로한 권역들에 대한 재해위험지수를 산정하고, 5 등급으로 분류하여 재해위험도를 판정하였다. 재해위험지수에 따른 등급은 숫자가 낮을수록 재해위험도가 높다고 정의하였다.

재해위험도 산정 결과는 Table 2와 같다. 각 주요소들이 재해위험도에 미치는 영향을 동시에 확인하기 위하여, 상위 10개씩 순차적으로 정리하였다. 재해위험도 I 등급 역사 권역은 대전역, 동대구역, 김천구미역, 공주역, 경산역, 계룡역, 오송역, 서대전역, 신경주역, 울산역으로 다른 역사 권역

Table 2. Grade of Disaster Risk

Grade	Hazard	Exposure	Vulnerability	Emergency Response and Recovery capability	Disaster Risk Index
I	Daejeon, Dongdaegu Gimcheongumi Gyeongsan, Gyeryong, Osong, Pohang, Seodaejeon Singyeongju Ulsan	Changwonjungang Cheonan-Asan Daejeon, Dongdaegu Gimcheongumi Gwangmyeong Osong, Seoul Suseo, Suwon	Cheonan-Asan Daejeon, Dongdaegu Gimcheongumi Gyeongsan Gyeryong Osong, Pohang Seodaejeon Singyeongju	Dunnae, Gokseong Gyeryong Hoengseong Jeongeup Jinbu, Mokpo Naju, Pyeongchang Yangpyeong	Daejeon Dongdaegu Gimcheongumi Gongju, Gyeongsan Gyeryong, Osong Seodaejeon Singyeongju Ulsan
II	Changwon Changwonjungang Cheonan-Asan Gongju, Jeonju Jinyeong Masan, Miryang Namwon, Nonsan	Busan, Changwon Dongtan, Gongju Manjong, Masan Naju, Singyeongju Ulsan Yeongdeungpo	Busan, Changwon Changwonjungang Gongju, Gupo Iksan, Miryang Nonsan, Seoul Ulsan	Busan Cheongnyangni Gangneung, Guryegu Gwangju-Songjeong Manjong, Miryang Namwon, Nonsan Sangbong	Busan, Cheonan-Asan Iksan, Jinyeong Miryang, Namwon Nonsan, Pohang Seoul, Suwon
III	Dongtan Gokseong Gupo, Guryegu Gwangmyeong Hangsin, Iksan Jije, Jinju Suwon	Gwangju-Songjeong Hangsin, Iksan Jeongeup, Jeonju Jije, Jinju Jinyeong, Miryang Yongsan	Dongtan Gwangmyeong Jeonju, Jije Jinyeong, Masan Namwon, Suwon Yeongdeungpo Yongsan	Gimcheongumi Gongju, Gupo Gyeongsan Iksan, Jeonju Jinju, Seodaejeon Singyeongju Yongsan	Changwon Gokseong, Gupo Gwangmyeong Jeongeup, Jeonju Jije, Masan Yeongdeungpo Yongsan
IV	Busan Cheongnyangni Jeongeup, Sangbong Seoul, Suncheon Suseo, Yecheon Yeongdeungpo Yongsan	Cheongnyangni Gupo, Guryegu Gyeongsan Namwon, Pohang Sangbong, Seodaejeon Suncheon, Yecheon	Cheongnyangni Guryegu, Hangsin Jeongeup, Jinju Mokpo, Sangbong Suseo, Yecheon Yeosu Expo	Daejeon Dongdaegu Hangsin, Jije Jinyeong, Pohang Seoul, Suncheon Ulsan Yeongdeungpo	Changwonjungang Cheongnyangni Dongtan, Guryegu Gwangju-Songjeong Hangsin, Jinju Naju, Sangbong Yangpyeong
V	Dunnae Gangneung GwangjuSongjeong Hoengseong, Jinbu Manjong, Mokpo Naju, Pyeongchang Yangpyeong Yeosu Expo	Dunnae, Gangneung Gokseong Gyeryong Hoengseong, Jinbu Mokpo, Nonsan Pyeongchang Yangpyeong Yeosu Expo	Dunnae, Gangneung Gokseong GwangjuSongjeong Hoengseong, Jinbu Manjong, Naju Pyeongchang Suncheon Yangpyeong	Changwon Changwonjungang Cheonan-Asan Dongtan Gwangmyeong Masan, Osong Suseo, Suwon Yecheon Yeosu Expo	Dunnae, Gangneung Hoengseong, Jinbu Manjong, Mokpo Pyeongchang Suncheon, Suseo Yecheon Yeosu Expo

보다 재해위험도가 높게 나타났다. 이 권역들의 공통점은 소방방재청의 국가지진위험지도에서 지진 위험도가 가장 높은 지역에 위치한다는 것으로 지진위험도가 재해위험도에 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 재해위험지수 산정 시 강우 등 태풍의 영향에 대한 고려가 상대적으로 작은 것에 기인한 것으로 판단된다.

고속철도 시설물은 내진설계가 되어 있으나, 지진위험도가 큰 위치에 있는 만큼 기존의 내진설계에 더하여 설계초과 지진에 대한 추가적인 내진보강도 재해위험도를 낮출 수 있는 방안이 될 수 있다. 이들 역사 권역들의 대응복구성은 III, IV, V등급에 분포하고 있어 상대적으로 대응복구성이 잘 갖추었다고 할 수 있으나, III등급에 해당하는 권역은 역무원 수와 주변지역의 소방, 의료시설을 늘려주거나 철도 유지보수 예산을 추가 배정하여 대응복구성을 제고할 수 있다.

포항역은 위험성 지수 I 등급 역사 권역 중 유일하게 재해위험지수가 II등급인 역사 권역이다. 포항역은 지진위험도에서 가장 위험한 지역에 위치하지만 노출성 지수에서 IV등급으로 상당히 낮은 것으로 나타났다. 이것은 포항역이 경부선의 종점으로 권역을 이용하는 승객들이 적고, 철도물류량도 많지 않은 이유인 것으로 판단된다.

비교적 재해위험지수가 낮아 등급이 높게 나타난 광명역, 창원역, 창원중앙역, 동탄역, 수서역 등의 도심지역에 위치하는 권역은 높은 노출성에도 불구하고, 비교적 취약성이 낮고 대응복구성이 우수한 것으로 나타났다.

서울역과 수원역의 경우 대응복구성이 잘 갖춘 환경임에도 불구하고 재해위험도가 비교적 높은 등급으로 나타났다. 이는 인구수의 영향으로 인한 노출성이 높고, 타 수도권 지역 대비 취약인구의 열차 사용으로 인한 취약성이 높은 것이 원인으로 나타났다. 따라서, 열차 사용 취약인구의 추가적인 대피방안 마련 등이 검토되어야 할 것이다.

5. 결 론

이 연구에서는 자연재해에 대한 철도시설물의 재해위험지수를 개발하고 재해위험도를 평가하였다. 재해위험지수 산정을 위한 4가지 주요소로 재해위험성, 노출성, 취약성, 대응복구성을 선정하고, 델파이기법과 주성분분석을 통하여 가중치를 산정하였다.

재해위험도 분석결과 다른 역사 권역보다 상대적으로 자연재해에 위험한 역사 권역은 대전역, 동대구역, 김천구미역, 공주역, 경산역, 계룡역, 오송역, 서대전역, 신경주역, 울산역로 나타났다. 이 역사 권역들의 공통점은 소방방재청에서 제시한 국가지진위험지도에서 가장 위험한 지역에 위치하고 있다는 점이다. 이러한 결과를 통하여 이 연구에서 제안된 재해위험지수는 태풍에 비하여 지진위험성의 비중이 상대적으로 영향이 큰 것을 알 수 있다.

도심지역에 위치한 역사 권역들은 낮은 취약성과 우수한 대응복구성으로 인하여 재해위험도가 상대적으로 낮게 나타났다. 서울역과 수원역은 노출성과 취약성으로 인하여 재해위험도가 낮지 않게 나타났으며, 취약인구에 대한 고려 등을 통하여 재해위험도를 낮출 수 있다.

위험성은 I 등급이나, 재해위험도는 II등급으로 산정된 포항역은 위치한 지역은 재해가 발생할 확률이 높지만 경부선의 종점으로 상대적으로 역사 권역을 이용하는 인구가 적어 재해위험도가 낮게 나타났다. 이를 통하여 단순히 자연재해만을 고려한 평가보다, 종합적인 재해위험도 평가 시의 차별성 및 중요성을 알 수 있다.

이 연구에 제시된 철도시설에 대한 재해위험지수 산정기법을 이용하여 철도시설에 대한 종합적인 재해위험도 평가가 가능하며, 철도 역사를 중심으로 철도시설의 상대적인 재해취약성을 판단할 수 있다. 다만 이 연구의 재해위험지수는 지진 위험성의 비중이 태풍에 비하여 상대적으로 크게 나타나므로 향후 강우 등 태풍으로 인한 위험성을 추가적으로 고려하는 것이 필요할 수 있다. 또한 향후 실제 재해 피해에 대한 데이터가 축적된다면 재해위험지수와 실제 피해 양상을 비교하여 보다 정확한 평가와 예측이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2016R1A2B4013051).

References

- Benouar, D., and Mimi, A. (2001). *Improving emergency management in Algeria*. Global Alliance International Workshop on Disaster Reduction, Reston, VA, USA.
- Davidson, R.A., and Shah, H.C. (1997). *An urban earthquake disaster risk index*. Report No. 121, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford University.
- Gyeonggi Research Institute (GRI). (2009). *A study on vulnerability assessment to climate change in Gyeonggi-Do*. Policy Research No. 2009-37.
- Han, S. (2013). *A study of multi disaster risk index in the development considering the multi risk factors - The case of Incheon Metropolitan City, Korea*. Master's thesis, University of Seoul.
- Han, S. (2016). Statistical and Engineering Risk Analysis for Seismic Risk Evaluation. *Risk and Insurance*, Vol. 121, No.2, pp.28-34.

- Han, S., Kang, N., and Lee, C. (2016). Disaster risk evaluation for urban areas under composite hazard factors. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 3, pp. 33-43.
- Incheon Development Institute (IDI). (2010). Preliminary study on the current status of climate change and the necessity of adaptation strategies in Incheon. IDI Research Report No. 2010-40.
- Jeon, S., Jung, G., and Jang, H. (2008). Earthquake-risk estimation of lifelines in Korea. *Proceedings of KSCE 2008 Convention*, The Korean Society of Civil Engineering, pp. 829-832.
- Korea Environment Institute (KEI). (2008). *Development and application of a climate change vulnerability index*. RE 2008-05.
- Korea Environment Institute (KEI). (2009). *Research on fragility analysis and measures of social infra facilities for strengthening climate change adaptation*. Report No. 2009-10, Korea Environment Institute.
- Kim, H. et al. (2005). *Estimation of potential hazard and loss by metropolitan flood damage*. FFC04-18, Urban Flood Disaster Management Research Center.
- Kim, M., Park, Y., Han, S., and Choi, S. (2018). Earthquake response characteristics of the catenary pole for arrangement conditions. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 3, pp. 31-36.
- Kim, S., and Kim, N. (2012). A study on vulnerability assessment to climate change: Focused on 22 municipalities of JeollaNamDo. *The Korean Governance Review*, Vol. 19, No. 2, pp. 99-123.
- Kim, Y. (2012). Risk analysis and reduction measures of natural disaster. *Railway Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 10-16.
- Kron, W. (2002). Flood risk = hazard $\times$ exposure $\times$ vulnerability. In B. Wu et al. (Eds.), *Flood defence 2002* (pp. 82-97). New York: Science Press.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT). (1997). *Research on seismic design standard II*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (MOLIT). (2018). *Rules of structural code on building*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (MOLIT), Korail and Korea Rail Network (KR). (2018). *55th railway annual statistics*.
- National Institute for Disaster Prevention (NIDP). (2002). *A study on the assessment of the regional vulnerability to earthquake disasters*. NIDP-2002-10.
- National Institute for Disaster Prevention (NIDP). (2008). *The evaluation of seismic fragility functions for railway systems in Korea*. NIDP-PR-2008-02-02.
- Park, Y., Kim, M., Han, S., and Choi, S. (2018). Seismic performance of the catenary system using fragility analysis. *J. Korean Soc Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 39-44.
- Park, Y., Yoon, H., and Shin, M. (2012). A study on the development plan of recovery technology for railroad infrastructure to natural disaster. *Proceedings of 2012 Autumn conference*, The Korean Society of Railway, pp. 747-752.
- Rossi, R., and Gilmartin, K. (1980). *The handbook of social indicators: Sources, characteristics, and analysis*. New York: Garland STPM Press.
- Seoul Development Institute (SDI). (2010). *A study on strategies of climate change adaptation in Seoul*. Report No. 2010-PR-02.
- Song, J., Lim, H., and Lee, Y. (2014). Development of system reliability analysis methods to enhance hazard resilience of lifeline networks. *Korean Society of Civil Engineers Magazine*, Vol. 62, No. 9, pp. 19-25.
- Yoon, E., Ryu, H., Kang, T., Kim, J., and Baag, C. (2005). A study on the seismic damage estimation in the model district of Seoul City. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 9, No. 6, pp. 41-52.

Received	January 30, 2019
Revised	February 7, 2019
Accepted	February 23, 2019