



## GIS를 활용한 산업단지 화재위험도 평가체계 개발

### Development of a Fire Risk Assessment System for Industrial Complexes Using GIS

최유진\* · 이종호\*\* · 박초롱\*\*\* · 손동욱\*\*\*\*

Kyujin Choi\* · Jongho Lee\*\* · Chorong Park\*\*\* · Dongwook Sohn\*\*\*\*

\* Main author, MS course, Department of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (choikj331@yonsei.ac.kr)

\*\* Corresponding author, Research Specialist, Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology, South Korea (leejongho@kict.re.kr)

\*\*\* Coauthor, Ph.D. course, Department of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (parkchorong@yonsei.ac.kr)

\*\*\*\* Coauthor, Professor, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (sohndw@yonsei.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** Industrial complexes, which contain a variety of facilities, equipment, and raw materials, and employ a large number of workers, are highly susceptible to severe damage caused by fire. Therefore, this study proposes a fire risk assessment system tailored to the characteristics of industrial complexes. **Method:** First, based on existing fire-related assessment systems, fire risk assessment system suitable for industrial complexes are reviewed. Second, 8 fire risk indicators for industrial complexes are selected from indicators collected based on previous studies: number of fire occurrences, building density, old building ratio, accessibility of fire engines, fire risk increasing facilities, fire hydrant, fire station, and evacuation risk reduction facilities. Third, appropriate assessment method is derived for each indicator. Finally, the developed fire risk assessment system is verified by applying the method to the Nam-dong industrial complex. **Result:** The proposed fire risk assessment system, specialized for industrial complexes, could identify and visualize fire vulnerable areas within the industrial complex. This study provides a foundation for quantitative and systematic fire risk assessment through GIS-based spatial analysis. The results are expected to be used to identify vulnerable areas that have potential fire hazards, enabling the establishment of preventive measures to minimize property loss and save lives.

#### KEYWORD

산업단지  
화재위험도  
위험평가  
평가체계

Industrial Complex  
Fire Risk  
Risk Assessment  
Assessment System

#### ACCEPTANCE INFO

Received Jul. 3, 2024  
Final revision received Aug. 9, 2024  
Accepted Aug. 16, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

산업단지에는 다양한 시설과 장비, 원자재 등이 포함되어 있어 화재 발생 시 재산 손실이 크게 일어난다.<sup>1)</sup> 또한 산업단지에는 많은 인원이 근무하여 인명피해로 이어질 가능성이 크다.<sup>2)</sup> 추가적으로 독성 물질 유출이나 공기 오염 등의 문제도 발생할 수 있다.

국가에서는 이러한 문제점들을 인식하고, 2022년 9월 보건복지위원회에서 노후 산업단지 재해예방을 위한 법안인 「산업단지 노후설비의 안전 및 유지관리에 관한 특별법안」을 발의하였다. 이는 지난 2022년 노후화 된 여수산업단지에서 4건 이상 발생한 가스누출 및 폭발 등의 화재사고와 2012년 경상북도 구미시에 위치한 공장에서 발생한 불산가스 누출사고 10주기를 맞아 발의되어 심사 중에 있다.<sup>3)</sup> 특별법안은 사업장의 노후 설비에 대한 관리 책임을 사업주 뿐만 아니라 정부와 지방자치단체에게도 부여해 산업단지 사업장의 노후설비로 발생하는 재해를 예방하기 위한 법안이다. 또한, 국회에서는 「노후국가산업단지 안전 및 지속가능성 지원을 위한 특별법안」 등과 같은 법안을 발의하여 심사 중에 있다.<sup>4)</sup> 그리고 2022년 11월 산업통상자원부에서 발표한 「혁신적·역동적 신산업

공간으로의 전환을 위한 산업단지 혁신 종합대책」에 따르면 각종 정보를 산업단지 기준으로 수집·분석·예측·대응할 수 있는 통합안전관리시스템을 도입하여 사고 유형과 원인을 분석하고 산업단지별·산업유형별 사고 예방 및 대응 방안을 수립할 계획이다. 그중 GIS (Geographic Information System)를 기반으로 한 위험관리지도 및 안전관리지도 시스템도 구축할 예정이다.<sup>5)</sup> 따라서, 이들의 주요 사안 및 기준들을 고려하여 화약고로 불리는 산업단지 재난 및 재해를 예방하기 위한 연구가 국가의 정책에 발맞추어 필수적으로 진행되어야 할 시점이다. 그러나, 정부의 산업단지별 관리를 추진하고자 하는 움직임에도 불구하고, 공장 및 산업단지의 화재 관련 연구는 건축물 단위의 화재위험 평가에만 국한되어있다. 예를 들어, 공장 종류별(전자, 화학, 제조 등)[1-7] 및 산업단지 업종별[8]로 화재위험을 분석하거나, 방화구획 공간에 따른 화재 예측을 하였다[9-10]. 또한, 머신러닝[11] 및 시뮬레이션[12-14]을 통해 산업단지 내 건축물의 화재피해를 예측하거나, 화재위험 선별을 위한 법령 분석 등만이 이루어졌다[15].

이에 본 연구는 산업단지를 대상으로 건축물 단위가 아닌 산업단지 단위의 공간 특성을 대상으로 GIS를 활용한 화재위험도 평가를 통해 잠재적인 화재 위험 요소와 약점을 식별하여 예방조치를 취함으로써 재산 및 인명손실을 최소화하는데 기여한다.

1.2. 연구의 방법

본 연구의 방법론은 다음과 같다. 첫째, 국내의 화재관련 평가제도를 분석하고, 산업단지에 적용할 수 있는 평가제도를 선정한다. 선정된 평가제도의 평가체계는 최대한 준용하되, 지표 및 평가방법 등은 산업단지에 적합하도록 변경한다. 둘째, 국내·외 선행연구 분석을 통해 화재위험도 평가지표를 도출하여 분석하고, 국내 공공데이터를 이용하여 산업단지를 평가할 수 있는 지표를 설정한다. 셋째, 설정된 평가지표를 기존 평가제도에 적용하고 GIS를 활용한 화재위험도 평가방법과 기준을 설정한다. 넷째, 설정한 화재위험도 평가지표와 평가방법을 인천 남동공단 산업단지에 적용하여 검증한다.

2. 평가체계 설정을 위한 기존 평가제도 분석

2.1. 국내 화재위험도 평가제도

국내 화재관련 평가제도에는 화재예방안전진단, 사전재난영향성 평가, 화재위험평가, 지역안전지수 등이 있는 것으로 조사되었다.

화재예방안전진단은 「화재의 예방 및 안전관리에 관한 법률」 제 41조에 따라 소방안전 특별관리시설물의 화재예방 및 안전관리를 체계적이고 효율적으로 수행하기 위해 실시한다. 이는 화재위험요인 조사, 소방계획 및 피난계획 수립, 소방시설 등의 유지·관리 사항, 비상대응조직 및 교육훈련, 화재 위험성 평가 등으로 구성된다.

사전재난영향성평가는 「초고층 및 지하연계 복합 건축물 재난관리에 대한 특별법」에 따라 층수가 50층 이상 또는 높이가 200미터 이상인 건축물 및 지하연계 복합 건축물의 경우에는 층수 11층 이상 수용인원 5천 명 이상인 시설을 대상으로 실시하며, 건축허가 이전에 재난예방 및 피해경감계획, 피난안전구역 설치 등을 검토한다.

화재위험평가는 「다중이용업소의 안전관리에 관한 특별법」에 명시되어 있으며, 다중이용업소가 밀집한 지역 및 건축물에 대해 화재 발생 가능성과 화재로 인한 불특정 다수의 신체·재산·생명상의 피해와 주변에 미치는 영향을 예측·분석하고 대책을 마련하는 제도이다. 이는 도로로 둘러싸인 지역의 중심 지점을 기준으로 진행된다.

지역안전지수는 「재난 및 안전관리 기본법」 제66조의 10에 따라, 매년 안전등급을 공표하는 제도로 자치단체의 안전관리 책임성을 강화하고 취약분야를 개선하여 안전사고 사망자를 체계적으로 줄이고자 노력하고 있다. 이 제도는 자치단체별 안전역량을 6개 분야(생활안전, 화재, 자살, 교통사고, 감염병, 범죄)에서 통계자료를 활용하여 5등급으로 계량화하여 평가하는 제도이다.<sup>6)</sup>

상기 4가지의 평가제도를 종합하면 Table 1.과 같다. 분석결과, 화재예방안전진단은 인프라시설, 사전재난영향성평가는 초고층건축물, 화재위험평가는 다중이용업소밀집지역, 지역안전지수는 시도·시군구를 대상으로 평가하고 있다. 본 연구의 대상인 산업단지는 지역 또는 단지의 화재위험도 평가를 뜻하기에, 지역안전지수가 가장 적합하다고 판단하였다. 이에, 지역안전지수의 6개 분야 중 화재분야를 분석대상으로 설정하였다. 그 외에, 화재예방안전진단과 사전재난영향성은 건축물 또는 시설물을 평가하므로 산업단지에 적용하기에 적합하지 않고, 다중이용업소의 화재위험평가는 소방서와의 거리나 밀집지역에 대한 평가가 있으나 건축물 내부의 화재감지,

Table 1. Comparison of the domestic fire risk assessment system

Categories	Fire prevention safety inspection	Pre-disaster impact assessment	Fire risk assessment	Regional safety index
Evaluation subject	Infrastructure facilities	High-rise building	Multi-use facility	Regional
Evaluation item	31 Items	7 Items	Space & Building	3 Category
Evaluation system	5 Class	-	5 Class	5 Class
Evaluation method	Total score by each category	Qualitative assessment by panel	Qualitative assessment by two experts	Utilize statistical data

Table 2. Weightings and annual indicators changes of fire risk category in the regional safety index

Year	Hazard (50)	Vulnerability (20)	Reduction (30)
2015	- Number of fatalities - Number of fire occurrences	- Number of vulnerable people to disaster - Number of workers in restaurant and bars - Number of warehouse and transportation service business	- Urban area size - Fiscal autonomy - Number of hospital beds
2018			- Medical staff - Fire rescue performance - Number of fire station workers
2019			- Medical staff - Fire rescue performance - Number of fire station workers - Fire-fighting policy budget
2021			- Number of old buildings - Number of warehouse and transportation service business - Fire rescue performance - Number of fire station workers - Fire-fighting policy budget

Table 3. Literature review of regional safety index

No.	Research area	Main implications
[16]	Ulsan metropolitan city	- Limitations of controlling over vulnerability and reduction indicators
[17]	Jeju special self-governing province	- Uncertain relationship between assessment indicators and fire risk reduction measures - Risk assessment at smaller spatial unit
[18]	Sejong special self-governing city	- Limitations of fatality statistics based on address rather than location of death - Uncertain relationship between assessment indicators and safety - Absolute assessment method
[19]	Gwangju metropolitan city	- Considering alley fire-fighting
[20]	Gwangju metropolitan city	- Limitations of relative assessment method in reflecting local government efforts and performance - Absolute assessment method
[21]	South Chungcheong Province	- Introducing assessment methods considering regional characteristics - Absolute assessment method
[22]	South Chungcheong province	- Removing barriers for securing golden time - Indicators of the presence of first-aid fire-fighting equipment is needed
[23]	Gyeonggi province	- Ensuring access routes for fire engines and installation of emergency fire-fighting equipment

경보, 피난통로, 마감재료 등을 평가하여 도시·지역관점에서의 화재 평가인 본 연구에 부적합하였다.

## 2.2. 지역안전지수 분석 및 평가체계 준용

2.1. 절을 바탕으로 지역안전지수를 준용한 산업단지의 평가체계를 구축하기 위해 관련 연구를 분석하였다. 지역안전지수는 행정안전부(2021)의 재난 위험성 평가체계에 따라, 위험지표는 50점, 취약지표는 20점, 경감지표는 30점으로 총 100점으로 평가하고 있다. 구체적으로, 위험지표는 화재발생 건수와 사망자 수, 취약지표는 노후건축물 수, 창고 및 운송서비스 업체 수, 경감지표는 화재구조실적, 소방서 종사자 수, 소방정책예산으로 구성되어 있다. 이에, 산업단지를 대상으로 화재위험 평가체계를 구축하고자 하는 본 연구는 지역안전지수의 재난 위험성 평가체계를 준용하였다. 그러나, 세부항목은 일반 지역을 대상으로 하고 있어 산업단지에 특화된 지표를 새로 선정할 필요가 있었다. 또한 지역안전지수는 통계자료를 기반으로 한 시군구별 분석에 한정되어 있어, 산업단지 단위의 화재위험등급을 평가하는 것은 불가능한 실정이었다. 실질적인 산업단지의 화재위험도를 공간적으로 도출하기 위해서는 세부적인 공간적 분석이 필요하다.

행정안전부는 지역안전지수 제도를 2015년에 첫 공표하고 이후 지속적으로 발전방안을 마련하여 Table 2.와 같이 시행하고 있으며, 다양한 지자체에서 이를 분석한 연구 및 보고서를 발행하고 있다. 본 연구에서는 지자체에서 발간한 보고서 중 화재 분야에 대해 시사점을 도출할 수 있는 보고서 8건을 선정하여 이를 분석해 본 연구에 적용할 수 있는 문제점 및 개선사항을 Table 3.과 같이 도출하였다[16-23].

지역안전지수의 선행연구를 종합해보면, 지역별 상대평가의 불합리성으로 인해 절대평가가 적합하다는 연구결과가 많았으며, 더 작은 공간단위의 평가도 필요하다고 하였다. 본 연구는 산업단지의 화재위험도를 평가하는 것이 목적이기에, 평가체계 개발 시 이러한 선행연구의 시사점을 반영하는 것이 적합하다고 판단하였다. 또한, 화재안전관리 측면에서의 지자체 노력으로는 골목길 화재발생에 대한 고려(소방차 진입), 골든타입, 비상소화장치에 대한 시사점을 얻을 수 있었으며 3장에서 화재위험도 평가지표 개발 시 우선적으로 고려하였다.

## 3. 산업단지 화재위험도 평가지표 설정

### 3.1. 선행연구 분석을 통한 도시 화재위험도 지표 수집

산업단지 화재위험도 평가지표 도출 과정은 Fig. 1.과 같다. 우선, 국내·외 선행연구 분석을 통해 화재위험도 지표를 수집하였다. 다만, 공장이나 산업단지의 화재위험 관련 연구를 분석하기에는 선행연구의 수가 부족하고, 공장 건축물 내부의 화재위험 관련 연구가 다수이기에, 목적에 맞게 지역 또는 단지를 평가할 수 있는 키워드를 선정하였다. 이에, 논문 제목 및 내용에 키워드로 ‘Urban fire spread model’, ‘Urban fire risk assessment’, ‘도시화재’, ‘도시화재확산모델’, ‘도시화재위험평가’, ‘산업화재평가’를 포함한 학술논문을 대상으로 하였다. 이때, Google Scholar와 RISS (Research Information Sharing Service)의 검색엔진을 통해 수집하였다. 이때, 심도있는 분석을 위해 SCI (Science Citation Index) 및 KCI (Korea Citation

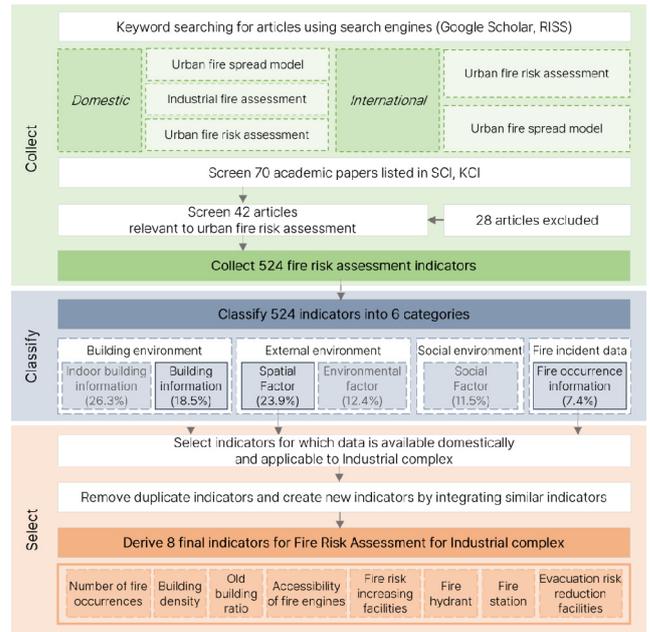


Fig. 1. Process of deriving fire risk assessment indicators for industrial complex

Index)에 등재된 학술논문으로 국한하였다. 이러한 선정 기준에 따라 국외 48편, 국내 22편의 논문이 수집되었다. 그중, 도시 화재평가와 관련이 없는 28개의 연구를 제외하여 최종적으로 국외 20편, 국내 22편의 총 42개의 연구가 분석에 활용되었다. 분석 결과, 총 524개의 도시 및 지역의 화재위험도 평가지표가 수집되었다.

### 3.2. 도시 화재위험도 지표 분류

앞서 3.1.절에서 수집된 도시 화재위험도 평가지표 중 산업단지의 화재위험도 평가지표를 체계적으로 선정하고자 기존 연구를 기반으로 분류체계를 수립하였다. 이때, 빅데이터를 기반으로 건축물 화재위험도 평가지표를 결정한 연구를 참고하였는데, 해당 연구에서는 ‘Building characteristic-condition’, ‘Socio-economy’, ‘Climate-weather’, ‘Fire protection’으로 분류하고 있었다[33]. 그러나, 본 연구는 건축물이 아닌 산업단지를 대상으로 하기에, 건물 외부의 공간 단위로 평가할 수 있는 공간정보 요인을 추가하여, ‘Fire protection’의 지표 및 건축물 밀집도, 도로상태 등의 지표를 포함하였다. 또한, 산업단지 단위의 분석은 개별 건축물의 내부적 특성과 분리될 필요가 있어, ‘Building characteristic-condition’를 건물에서 구득 가능한 정보의 특성에 따라 세부적으로 건물내부정보, 건물정보로 구분하였다. 그리고, 본 연구에서 준용하고자 하는 지역안전지수는 2.2.절과 같이 화재발생정보를 위해지표로 설정하여 재난위험성을 평가하고 있기에, 이를 하나의 요인으로 추가하였다.

그 결과, 지표는 크게 건물환경 요인(건물내부정보, 건물정보), 외부환경 요인(공간적요인, 환경적요인), 사회환경 요인, 화재발생 정보 요인으로 구분되었으며, 항목별로 포함된 평가지표와 그 비율은 Table 4.와 같이 요약된다. 첫 번째로, 건물환경 요인은 건물과 관련된 지표인 ‘Building characteristic-condition’를 포함하였으며, 건물 내·외부에서 구득 가능한 정보의 특성을 고려하여 세부적으로

Table 4. Categorization of urban fire risk assessment indicators

Categories	Indicators	Count	Ratio
<b>Building environment</b>			
Indoor building information	Room temperature, window size, fire alarm system, evacuation sign, etc.	138	26.3%
Building information	Building structure, building materials, building height, building age, etc.	97	18.5%
<b>External environment</b>			
Spatial factor	Fire station, fire hydrant, building density, road condition, etc.	125	23.9%
Environmental factor	Climate, weather, humidity, temperature, wind speed, etc.	65	12.4%
<b>Social environment</b>			
Social factor	Population density, property, education, fire vulnerable people, etc.	60	11.5%
<b>Fire incident data</b>			
Fire occurrence information	Fire source, number of fire occurrences, fatalities, etc.	39	7.4%
<b>Total</b>		<b>524</b>	<b>100%</b>

구분되었다. 건물내부정보는 실내의 요소들로 구성되었으며, 실크기, 실내 마감재, 피난 표지판 등의 138개 지표가 분류되었다. 건물정보는 건축물대장에서 파악할 수 있는 건물의 일반적 요소들로 구성되었으며 건물구조, 건물높이, 건물연령 등의 97개 지표가 포함되었다. 두 번째로, 외부환경 요인은 화재발생에 영향을 미치는 건물 주변의 외부환경과 관련된 지표들을 분류하였으며, 세부적으로 공간적요인, 환경적요인으로 구분되었다. 공간적요인은 소방활동 접근성 및 화재확산과 관련된 외부환경 및 인프라 관련 요소들로 구성되었으며, 소방서 위치, 도로 상태, 건물 밀집도, 주유소 위치 등의 125개 지표가 분류되었다. 환경적요인은 화재발생과 확산에 영향을 미치는 기후 및 자연환경 지표인 'Climate-weather'를 포함하여, 기후, 풍속, 강수량, 식생 등의 65개의 지표가 포함되었다. 세 번째로, 사회환경적 요인은 인구통계 및 사회·경제적 측면의 지표인 'Socio-economy'를 포함하여, 교육수준, 인구밀도, 재산 등의 60개 지표가 분류되었다. 네 번째로, 화재발생정보 요인으로는 실제 과거에 발생했던 화재 사고와 관련된 정보로 구성되며, 화재 발생건수, 화재 사망자수 등의 39개 지표가 포함되었다.

### 3.3. 산업단지 화재위험도 지표 선정

앞서 3.2.절에서 분류한 6가지 요인 중 건물내부정보가 가장 높은 비율(26.3%)을 차지하였으나, 본 연구는 개별 건축물의 내부적 특성보다는 거시적인 도시관점에서 산업단지 전체의 화재위험도를 평가하고자 하므로, 건물 실내와 관련된 미시적인 지표인 건물내부정보는 평가지표에서 제외하였다. 반면, 건물정보(18.5%)와 공간적요인(23.9%)은 타 요인 대비 높은 빈도로 분석에 활용되고 있었을 뿐만 아니라, 개별건물이 아닌 산업단지 범위의 데이터로 활용 가능하여 평가지표로 선정하였다. 다만, 산업단지 단위의 데이터 확보가 가능한 지표만을 평가지표로 선정하였다. 다음으로, 환경적요인

(12.4%)과 사회적요인(11.5%)은 시군구 단위의 데이터만 제공하고 있어, 산업단지 단위의 데이터 확보가 필수적인 본 연구에 적용하기에는 한계가 있었고, 타 요인 대비 낮은 빈도로 분석에 활용되고 있어 변수의 영향도가 낮은 것으로 파악되어 평가지표에서 제외하였다. 마지막으로, 화재발생정보 요인은 가장 낮은 비율(7.4%)을 보였으나, 본 연구에서 준용하고자 하는 지역안전지수가 화재발생정보를 활용하여 위험성을 평가하고 있을 뿐만 아니라, 화재발생 시 대규모 재산피해와 인명피해를 초래하는 산업단지의 특성상 화재의 피해규모는 향후 화재위험을 예측하고 예방하는 데 중요하기에 평가지표로 선정하였다. 다만, 기존의 평가체계를 준용하여, 화재 사망자수, 화재 발생건수를 채택하였으나, 화재 사망자 수는 산업단지로 범위를 한정할 시 데이터의 불균형 문제가 발생하여 평가지표에서 제외하였다.

이렇게 선정된 평가지표에서 중복지표를 제거하고, 유사한 상위 개념을 가지는 하위개념의 지표들은 종합하여 새로운 지표를 생성하여 8개의 지표를 최종 선정하였다. 구체적으로, 주유소, 위험물 저장소 등을 통합하여 화재위험 증가시설물 지표를, 대피소, 학교, 공원 등을 통합하여 피난위험 감소시설물 지표를 생성하였다. 따라서, 최종 선정된 산업단지 화재위험도 지표는 화재발생건수, 건물밀도, 노후건물비율, 소방차 접근성, 화재위험 증가시설물, 소방용수시설, 소방서 및 119안전센터, 피난위험 감소시설물로, 해당 지표를 사용한 선행연구는 Table 5.와 같다.

### 3.4. 최종 산업단지 화재위험도 평가지표

첫 번째로, 화재발생건수는 화재발생 빈도의 직접적인 지표로, 높은 화재 발생 건수는 높은 화재 위험을 의미하기에 화재취약지표로 선정되었다. 해당 지역 및 건물에서 화재가 얼마나 자주 발생하는지를 직접적으로 나타내는 지표로, 지역안전지수에서도 활용되고 있다. 이에, 관련 연구에서는 시설물의 화재위험도를 화재발생건수와 재산피해액으로 평가하거나[24], 지역위험도를 재난건수, 피해액, 인구수로 평가하였다[25]. 또한, 화재발생건수가 화재피해에 미치는 영향을 밝히기도 하였으며[26-27], 이를 건물공간정보와 융합하여 화재발생 위험지역 예측을 위한 학습 데이터셋으로 활용하기도 하였다[28].

두 번째로, 높은 건물밀도는 화재의 위험성을 증가시키기에 화재취약지표로 선정되었다. 화재 발생 시 건물밀집지역은 구난이 어렵고[29], 소방차량의 진입이 어려워 화재진압이 어렵다[30-31]. 또한, 건물 사이의 좁은 간격으로 인해 화재 확산이 용이해지고[29, 32], 비상대피공간으로 기능하는 오픈스페이스의 부족으로 인해 위험하다[32]. 빅데이터를 활용하여 건축물 화재위험도 평가지표를 분석한 관련 연구에서 건물밀도는 주요 평가지표로 선정되었다[33]. 또한, 화재발생건수와 건물밀집도는 0.74의 높은 상관관계를 가지는 것으로 분석되었다[34]. 그리고, 화재 발생 시 높은 피해가 예측된 지역은 주로 건물밀도가 높은 도심지역으로 밝혀졌다[35]. 이에 다수의 연구에서 건물밀도를 화재취약요인으로 포함하여 화재위험도를 분석하거나[29, 31, 34, 36-37], 재해위험도를 분석하였다[38]. 또한, 소방서비스 취약지역을 도출하거나[39], 화재확산위험을 계산하는데에 건물밀도가 활용되기도 하였다[30, 32].

세 번째로, 노후건물은 높은 화재위험성을 가지기에 화재취약지

Table 5. Fire risk assessment indicators for industrial complex

No.	Indicators							
	Hazard	Vulnerability				Reduction		
	Number of fire occurrences	Building density	Old building ratio	Accessibility of fire engines	Fire risk increasing facilities	Fire hydrant	Fire station	Evacuation risk reduction facilities
[24]	●			●				
[25]	●				●			
[26]	●							
[27]	●							
[28]	●							
[29]		●	●	●		●		
[30]		●						
[31]		●		●	●	●	●	
[32]		●						
[33]		●	●	●		●	●	
[34]		●						
[35]		●		●			●	
[36]		●					●	
[37]		●						
[38]		●	●	●				
[39]		●						
[40]		●	●	●			●	
[41]			●		●		●	●
[42]			●	●	●	●	●	
[43]			●	●				
[44]			●	●		●		
[45]			●	●				
[46]				●		●		
[47]				●			●	
[48]				●	●	●	●	
[49]					●			
[50]					●		●	
[51]					●			
[52]						●		
[53]				●			●	
[54]	●							
[56]								●
[58]								●
[59]								●
[61]								●
[62]							●	
[63]							●	

표로 선정되었다. 노후화된 건물은 내화성능이 낮고, 화재 시 열화에 따른 구조적 붕괴위험이 있어 2차 피해 가능성을 내포하고 있기에 위험하다[38, 40-41]. 또한, 건물의 노후화로 인한 균열, 누수, 파손 등은 전기배선의 꼬임, 박리, 과부하, 누전 등의 원인으로 작용하여 화재발생의 원인 중 가장 높은 비율을 차지하는 전기에 의한 화재로 연결될 가능성이 높다[29, 40, 42-44]. 빅데이터를 활용하여 건

축물 화재위험도 평가지표를 분석한 관련 연구에서 건축물 노후도는 주요 평가지표로 선정되었다[33]. 또한, 노후건축물은 화재발생 및 피해확산의 주 원인으로 밝혀졌다[42, 45]. 이에 다수의 연구에서 노후건물비율을 화재취약요인으로 포함하여 화재위험도를 분석하였다[29, 41-42].

네 번째로, 소방차 접근성은 골든타임 내 소방차의 화재 현장 도

작 여부를 결정하기에 화재취약성을 판단하는 핵심 지표이다. 화재 발생 시 초기대응을 위한 소방활동의 어려움은 대형화재로 확산될 위험성을 높인다. 특히, 화재발생의 위험성이 높은 전통시장을 중심으로 화재위험요인을 도출한 연구에서는 다중 통로 점유 및 불법주정차로 인한 방화구획의 어려움을 언급하고 있다[40]. 이에 다수의 연구에서 소방차 접근성을 화재취약요인으로 포함하여 화재위험도를 분석하였다[31, 35, 42-43, 46-47].

다섯 번째로, 주유소 및 위험물저장소와 같은 시설물은 대량의 가연성 및 폭발성 물질을 저장하고 있어 화재 발생 시 폭발의 위험 및 대규모 화재의 원인으로 작용하여 화재 위험성을 높이는 요인이다. 도시화재의 원인이 될 수 있는 위험물 처리시설에는 가스취급시설, 유독물취급시설, 화학물질 취급시설 등이 있는데[24], 이러한 위험물질이 포함된 화재는 일반적인 화재보다 진압이 어렵고, 화재가 급격히 확산될 위험이 있다. 이에 다수의 연구에서 주유소 및 위험물저장소와 같은 화재 위험 증가 시설물을 화재취약요인으로 포함하여 화재위험도를 분석하였다[31, 48-51].

여섯 번째로, 소방용수시설에는 비상소화장치 및 소화전이 포함되며, 화재 발생 시 초기 대응과 진압에 필수적인 기능을 하기에 화재 위험성을 줄이는 핵심 지표이다. 또한, 소방용수는 화재현장에 즉시 제공되어 소화 작업의 효율성을 증가시켜 화재 확산을 방지하는 역할을 한다. 빅데이터 기반의 건축물 화재위험요인을 분석한 연구에서는 소방용수시설을 화재방어요소로 분석하였다[33]. 또한, 다수의 연구에서 소방용수시설을 화재위험도 경감요인으로 설정하여 화재위험을 분석하였다[29, 31, 42, 46, 48, 52].

일곱 번째로, 소방서 및 119안전센터는 화재 발생 시 소방차량의 화재현장 도착시간 및 진화시간과 관련되기에 화재 위험성을 감소시키는 지표이다. 초동진압을 위한 골든타임이 지나면 플래시 오버(flashover) 현상이 발생하는데, 이는 진화시간을 늦춰 인간의 생명 및 피해액 등의 화재피해를 높인다. 관련 연구에서는 과거 3년간 발생한 화재의 공간적 분포를 119안전센터의 서비스지역과 중첩하여 소방서비스 사각지대를 연구하였다[53]. 또한, 다수의 연구에서 소방서와 119안전센터를 화재위험 경감에 영향을 미치는 요인으로 보고 화재위험을 분석하였다[31, 35-36, 42, 47-48, 50].

마지막으로, 피난 위험 감소 시설물은 화재 발생 시 사람들이 안전하게 대피할 수 있는 장소를 제공하고, 인명 손실을 줄이는데 핵심적인 역할을 하여 화재 위험도를 낮추는 지표로 기능한다. 또한, 재난 발생 시 복구를 위한 주요 기반시설으로 기능하며, 피난 시 피난 지주로도 역할을 한다. 재해위험도를 피난위험도, 화재위험도, 시설위험도를 종합하여 평가한 연구에서도 교육연구, 공공용, 공원, 대피소 등을 피난 위험 감소 시설물로 정의하여 연구에 활용하였다[41].

## 4. 산업단지 화재위험도 평가방법

### 4.1. 지표별 산업단지 화재위험도 평가방법

3.3.절에서 선정된 8개의 산업단지 화재위험 평가지표는 2.2.절의 지역안전지수 평가체계를 기반으로 위해지표, 취약지표, 경감지표로 분류되었다. 첫 번째로 위해지표에는 화재발생 가능성과 관련된 평가지표가 포함되었다. 두 번째로, 취약지표에는 화재발생 시

Table 6. Fire risk assessment method for industrial complex

Indicators	Assessment method	Assessment criteria	Weight
<b>Hazard</b>			<b>50%</b>
Number of fire occurrences	Number of fire occurrences divided by the block area	<ul style="list-style-type: none"> <li>Natural break</li> <li>5classes</li> </ul>	50%
<b>Vulnerability</b>			<b>20%</b>
Building density	Sum of building area divided by the block area	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equal interval</li> <li>5classes (0~80%)</li> </ul>	5%
Old building ratio	The number of old buildings divided by the total number of buildings within block	<ul style="list-style-type: none"> <li>Old building: over 30 years</li> <li>Equal interval</li> <li>5classes (0~100%)</li> </ul>	5%
Accessibility of fire engines	Buffer analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vulnerable road: road width less than 4m</li> <li>50m, 100m</li> </ul>	5%
Fire risk increasing facilities	Buffer analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hazardous materials facility: within 250m</li> <li>Gas station: within 25m</li> </ul>	5%
<b>Reduction</b>			<b>30%</b>
Fire hydrant	Buffer analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Within 100m</li> </ul>	10%
Fire station	Network analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Within 5minutes by vehicle</li> </ul>	10%
Evacuation risk reduction facilities	Network analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Within 5minutes walk</li> <li>Walking speed: 1.38m/s for adults</li> </ul>	10%

피해를 증가시킬 수 있는 평가지표가 포함되었다. 마지막으로 경감 지표에는 화재 발생 시 피해를 줄일 수 있는 요소들이 포함되었다. 각 지표별로 선정된 화재위험 평가방법은 Table 6.과 같이 요약되며, 이는 다음과 같은 과정을 통해 선정되었다.

#### 1) 위해지표

위해지표로 분류된 화재위험도 평가지표에는 화재발생건수가 있다. 화재건수는 산업단지의 면적이 클수록 발생할 가능성이 상대적으로 높기에, 블록의 크기 차이를 고려하여 표준화 및 정규화를 통해 블록 간의 비교가 가능한 수치로 변환하는 과정이 필요하다. 표준화는 각 지역의 화재발생 건수를 각 지역의 총 면적(m<sup>2</sup>)으로 나누어 조정함으로써[24], 평가 대상지 간의 크기 차이를 조정하여, 각 지역 내 화재 관련 사건의 상대적 빈도와 영향을 평가할 수 있게 한다. 정규화는 표준화된 점수를 0에서 1까지의 척도로 변환하여 일관된 범위 내에서 데이터를 직접 비교 가능하게 한다. 이와 같은 과정을 통해 도출된 화재발생 점수는 등급화하여 위험수준을 파악하는 데에 활용된다. 본 연구에서는 다수의 연구에서 5등급으로 화재위험도를 평가한 것에 기반하여, 5등급을 설정하였다[24, 54]. 이때, 화재발생 데이터는 특정 구간에 집중되거나 분포가 고르지 않은 경우가 많기에, 데이터의 자연스러운 구분점을 찾아내는 것이 중요하다. 따라서, 본 연구는 이에 효과적인 Jenk's Natural Break 방법을 통해 화재위험도의 과소평가 및 과대평가 지역의 발생을 줄였다.

2) 취약지표

취약지표로 분류된 화재위험도 평가지표에는 건물밀도, 노후건물 비율, 소방차 접근성, 화재위험 증가시설물이 있다.

첫 번째로, 건물밀도의 평가방법은 Table 7.과 같이 요약된다. 크게 세 가지 유형으로, 건물 수, 건축 연면적, 건축면적을 활용하여 건물밀도를 구할 수 있다. 우선, 건물 수를 활용하는 방법으로는 행정구역별 건물 수를 해당 행정구역 면적으로 나누어 건물밀도를 구하는 것이 일반적이고[35, 37, 39], 해당 구역의 건물 수 자체를 활용하기도 한다[31]. 다음으로, 건축 연면적을 활용하여 건물밀도를 산출하는 방법으로는 해당 구역의 총 건축물 연면적을 총 건축면적으로 나누어 계산한 비율을 활용한다[36]. 이는 평균층수와 유사한 개념으로 파악된다. 또한, 대지면적에 대한 지상 연면적의 비율인 용적률을 활용하여 용적률 초과 대지의 면적을 블록면적으로 나눈 비율을 건물밀도로 활용한 연구도 있다[38]. 마지막으로, 건축면적을 활용하여 건물밀도를 계산하는 방법으로는 행정동별 건축면적을 행정동 면적으로 나눈 비율을 활용하며 이는 건폐율과 유사한 개념으로 파악된다[34]. 이에, 블록별 건폐율을 활용하기도 하며[38], 블록별 건폐율 초과대지의 면적을 블록면적으로 나눈 비율을 건물밀도의 지표로 활용한 연구도 있다[29]. 기존 연구에서는 도출한 건물밀도를 등급화하여 화재위험을 평가하였는데, 3등급[31, 37], 5등급[29, 34, 38], 9등급[39]으로 구분하였다. 도시 내 산업단지는 공장이 밀집해 있기에, 화재가 발생할 경우 인접 건물로 화재확산이 용이하여 건물 사이의 물리적인 거리가 화재위험평가의 핵심적인 요소이다. 따라서 건물 밀집도를 직관적으로 파악 가능한 대지면적에 대한 건축면적의 비율인 건폐율을 활용하는 것이 적합하다. 이에, 본 연구에서는 단위블록별 건축면적의 합을 단위블록의 대지면적으로 나눈 비율을 건물

밀도로 평가하였다. 또한, 다수의 기존 연구와 2.2.장에서 지역별 상대평가가 불합리하다는 의견에 따라 등간격으로 구분하는 equal interval 방법을 활용하였다. 이때, 국가산업단지의 건폐율은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 시행령 제84조 제4항 제6호에 따라 최대 80%까지 가능하기에, 이를 5등급으로 구분하였다.

두 번째로, 노후건물 비율의 평가방법은 Table 8.과 같이 요약된다. 노후건물 수를 전체 건물 수로 나누어 노후건물 비율을 구하는 것이 일반적이거나, 건물의 노후 정도를 건축연령 30년 이상[43], 20년 이상[29], 10년 이상[42]으로 다양하게 정의하였다. 이와 같은 노후 건물 수 대신, 구역별 건축연령 평균값을 활용하여 노후도를 평가한 연구도 있다[41]. 관련 연구들에서는 노후건물 비율을 주로 5등급화하여 화재위험을 평가하였다[29, 41]. 「도시 및 주거환경 정비법」 시행령 제2조 제3항 제1호에서는 준공된 후 20년 이상 30년 이하의 범위에서 정하는 기간이 지난 건축물을 노후화 지표로 명시하고 있기에, 본 연구에서는 이와 같은 법적 정의를 근거로 노후화가 발생할 가능성이 큰 준공된 후 30년 이상의 건축물을 노후건축물이라고 정의하였다. 산업단지 내 다수의 노후건물이 존재할 경우 화재발생 및 확산의 위험이 급격히 증가하기에, 단순히 평균연령을 평가하는 것보다 노후건물의 수가 많을수록 화재 취약성이 높아진다. 이에, 단위블록별 노후건축물 수를 단위블록내 전체 건축물 수로 나눈 노후건물 비율을 평가방법으로 설정하였다. 또한, 다수의 기존 연구와 2.2.장에서 지역별 상대평가가 불합리하다는 의견에 따라 등간격으로 구분하는 equal interval 방법을 활용하였다. 이때, 노후건물의 비율은 이론상 0%에서 100%까지 가능하기에, 이를 5등급으로 구분하였다.

세 번째로, 소방차 접근성의 평가방법은 Table 9.와 같이 요약된다. 다수의 연구에서 소방차량이 통행 가능한 도로의 폭 및 노상주차로 인한 도로 폭 잠식을 고려하여 소방차 접근성의 평가가 이루어졌다. 그러나 소방차 진입을 고려한 최소도로 폭은 다양하였는데, 폭 4m 미만의 도로[46], 노상주차를 포함한 각종 장애물이 존재하는 6m 미만의 도로[29, 38], 폭 3m 이하[35], 폭 5m 미만의 도로[48]를 취약도로로 정의하였다. 이와 같이 정의된 취약도로의 평가방법은 크게 두 가지 유형으로, 도로 자체의 취약성과 도로로부터의 거리에 따른 취약성으로 구분된다. 우선, 도로 자체의 취약성은 행정구역 내의 취약 도로 수를 전체 도로 수로 나누거나[35], 차량통행 불가능

Table 7. Building density assessment methods and criteria used in previous studies

No.	Assessment method	Assessment criteria
[29]	Sum of site area divided by block area	• 5 classes (Z-score, equal interval)
[31]	The number of buildings within the area	• High: over 100 • Moderate: 50~100 • Low: under 50 (units)
[34]	Sum of building area divided by administrative district area	• 5 classes (-1.5SD, -0.5SD, 0.5SD, 1.5SD)
[35]	The number of buildings within administrative district divided by the administrative district area	• 4 classes (Fire damage: 0~0.8, equal interval)
[36]	-Sum of total floor area divided by sum of total building area -Clustering analysis	• 7 classes (GiZ-Score: -99%, -95%, -90%, not significant, 90%, 95%, 99%)
[37]	The number of buildings divided by the administrative district area	• High: over 80 (Units/Ha) • Moderate: 40~80 (Units/Ha) • Low: under 40 (Units/Ha)
[38]	Building coverage ratio by block	• 5 classes (0~100%, equal interval)
	Floor area ratio by block	• 5 classes (0, 200%, 400%, 600%, 800%)
[39]	The number of buildings in a census block divided by the census block area	• 9 classes (0~8, geometrical interval)

Table 8. Old building ratio assessment methods and criteria used in previous studies

No.	Assessment method	Assessment criteria
[29]	The number of old and unauthorized buildings divided by total number of buildings in the block	• Old building: 20 years or more • 5 classes (0%, 20%, 40%, 60%)
[41]	Average value of building age	• 5 classes (class 1: 10%, class 2: 25%, class 3: 30%, class 4: 20%, class 5: 10%)
[42]	The number of old buildings divided by total number of buildings	• Old building: 10 years or over
[43]	The number of old buildings divided by total number of buildings	• Old building: 30 years or over

Table 9. Accessibility of fire engines assessment methods and criteria used in previous studies

No.	Assessment method	Assessment criteria
[14]	Exclude inaccessible roads for fire engines	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vulnerable road: road width less than 4m, or less than 6m with obstacles, including street parking</li> </ul>
[16]	-Exclude inaccessible roads for fire engines -Buffer analysis of road	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vulnerable road: road width less than 3m</li> <li>High: over 100m radius</li> <li>Moderate: 50~100m radius</li> <li>Low: less than 50m radius</li> </ul>
[20]	The number of inaccessible roads divided by total number of roads in administrative district	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vulnerable road: road width of 3m or less</li> </ul>
[23]	Exclude inaccessible roads for fire engines	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vulnerable road: road width less than 4m, or less than 6m with obstacles, including street parking</li> </ul>
[27]	Buffer analysis of road	<ul style="list-style-type: none"> <li>20m, 60m, 100m, 140m, 180m, 250m, 350m</li> </ul>
[28]	The number of inaccessible lots divided by total number of lots	<ul style="list-style-type: none"> <li>Number</li> </ul>
[31]	-Exclude inaccessible roads for fire engines -Overlay analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vulnerable road: road width less than 4m</li> </ul>
[32]	Density analysis of illegal parking	<ul style="list-style-type: none"> <li>Within 5-minute walk (280m radius)</li> </ul>
	Density analysis of street parking lot	<ul style="list-style-type: none"> <li>Within 5-minute walk (280m radius)</li> </ul>
[33]	Exclude inaccessible roads for fire engines	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vulnerable road: width less than 5m</li> </ul>

필지 수를 총 필지 수로 나눠 도로컨디션을 평가하였다[43]. 한편, 점수중첩법을 활용하거나[46], 불법주정차 및 노상주차장의 밀도분석을 통해 평가한 연구도 있다[47]. 다음으로, 도로로부터의 거리에 따른 화재 취약성은 주로 버퍼분석을 활용하여 평가되었다[31, 42]. 관련 연구에서는 50m, 100m를 기준으로 화재 취약성을 3등급화하여 평가하였다[31]. 본 연구에서는 도로의 최소 폭을 4m 이상으로 명시한 「건축법」 제2조에 따라, 이와 같은 법적 정의를 근거로 4m 미만의 도로를 소방차 진입이 어려운 취약도로로 정의하였다. 또한, 도심의 산업단지를 대상으로 하는 본 연구의 연구대상지를 고려하여, 도시지역의 화재위험도를 평가한 Srivanit (2011)의 연구를 기반으로 화재취약성을 평가하였다. 결론적으로, 취약도로를 제외한 폭 4m 이상의 도로만을 추출하여, 해당 도로를 버퍼분석을 활용하여 도로로부터의 거리에 따라 50m, 100m를 반경 기준으로 화재취약성을 평가하였다[31].

네 번째로, 화재 위험 증가시설물에는 위험물저장소, 주유소 등이 있다. 이로 인한 화재 취약성은 일반적으로 버퍼(buffer)를 활용하여 평가하는데, 연구마다 위험반경 기준이 다양하다. 우선, 위험물 저장소의 평가방법은 Table 10.과 같이 요약된다. 한국가스안전공사의 폭발물(가스) 최대 안전거리인 250m를 반경 기준으로 하거나[48], 반경 0.8km, 1.6km를 기준으로 3등급화한 사례가 있다[31].

Table 10. Fire risk increasing facilities (hazardous materials facility) assessment methods and criteria used in previous studies

No.	Assessment method	Evaluation criteria
[31]	Buffer analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>High: 1,600m or more</li> <li>Moderate: 800~1,600m</li> <li>Low: 800m or less</li> </ul>
[48]	Buffer analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>250m</li> </ul>
[49]	Buffer analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Residential building: 10m</li> <li>Educational facilities: 30m</li> <li>Cultural properties: 50m</li> </ul>

Table 11. Fire risk increasing facilities (gas station) assessment methods and criteria used in previous studies

No.	Assessment method	Assessment criteria
[31]	Buffer analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>High: 1,600m or more</li> <li>Moderate: 800~1,600m</li> <li>Low: 800m or less</li> </ul>
[48]	Buffer analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>25m</li> </ul>
[49]	Buffer analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Residential building: 10m</li> <li>Educational facilities: 30m</li> <li>Cultural properties: 50m</li> </ul>
[50]	Buffer analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>5 Classes (20m, 50m, 200m, 1,000m)</li> </ul>
[51]	Buffer analysis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Very high: 0~100m</li> <li>High: 50~250m</li> <li>Moderate: 150~500m</li> <li>Low: 300~500m</li> <li>Very low: 500m or more</li> </ul>

건물 유형에 따라 주거용 건물은 10m, 학교·유치원 등은 30m, 문화재는 50m로 적용하기도 하였다[49]. 다음으로 주유소는 Table 11.과 같이 요약된다. 주로 주유소를 중심으로 한 위험 반경을 기준으로 등급화하였는데[51], 반경 20m, 50m, 200m, 1,000m를 기준으로 5등급화하거나[50], 반경 0.8km, 1.6km를 기준으로 3등급화 하였다[51]. 한편, 서울시에서 조사한 주유소 폭발사고 사례를 기준으로 인근 건물피해 최소범위인 25m를 적용하거나[48], 건물용도에 따라 다른 반경기준을 적용하기도 하였다[49]. 본 연구에서는 위험물 저장소 및 주유소 반경 내 건물은 화재 발생 시 폭발로 인한 위험성이 있어, 특정 지점을 중심으로 일정 반경 내의 영향을 평가하는 방법인 버퍼 분석을 선정하였다. 이때, 실제 사례를 분석하여 위험반경을 설정한 김항배, 김동문, 오승훈(2002)의 연구에 따라 위험물 저장소는 폭발물(가스) 최대 안전거리인 250m, 주유소는 폭발사고의 인근 건물피해 최소범위인 25m를 적용하였다[48].

### 3) 경감지표

경감지표로 분류된 화재위험도 평가지표에는 소방용수시설, 소방서 및 119안전센터, 피난위험 감소시설물이 있다.

첫 번째로, 소화전과 같은 소방용수시설의 화재위험 경감성 평가 방법은 Table 12.와 같이 요약된다. 소방용수시설은 GIS 공간분석 기법인 버퍼(buffer) 분석을 활용하여 서비스지역을 도출하는 것이 일반적이다. 그러나 관련연구에서 설정한 반경범위는 45~140m로 다양하였는데, 소화전에서 호스를 연결하여 차량의 이동 없이 진화 가능한 최대범위를 고려하여 45m를 기준으로 설정한 사례가 있고[48], 50m로 설정하기도 하였다[42]. 또한, 주거·상업·공업지역에

Table 12. Fire hydrant assessment methods and criteria used in previous studies

No.	Assessment method	Assessment criteria
[29]	Buffer analysis	• 100m
[31]	Buffer analysis	• High: more than 100m • Moderate: 50~100m • Low: less than 50m
[42]	Buffer analysis	• 50m
[46]	Buffer analysis	• 140m
[48]	-	• 45m
[52]	Buffer analysis	• 100m

설치하는 경우 소방대상물과의 수평거리를 100m 이하, 그 외 지역은 140m 이하가 되도록 정의한 「소방기본법」 시행규칙 제6조 제2항의 소방용수시설의 설치기준에 따라 140m로 설정하거나[46], 100m로 설정하였다[29, 52]. 한편, 50m, 100m를 기준으로 화재위험도를 3등급화 하기도 하였다[31]. 본 연구는 다수의 선행연구에 따라, 소방용수시설을 중심으로 화재위험이 경감되는 반경을 명확히 파악할 수 있는 방법인 버퍼분석을 활용하였다. 이때, 본 연구의 분석대상인 산업단지는 「소방기본법」 시행규칙에서 명시한 주거·상업·공업지역에 해당하기에 이러한 법적근거를 기반으로 100m를 버퍼 분석의 반경 기준으로 선정하였다.

두 번째로, 소방서 및 119안전센터의 화재위험 경감성 평가방법은 Table 13.과 같이 요약된다. 일반적으로 실제 도로망을 반영한 GIS 공간분석기법인 네트워크(network) 분석을 활용하여 소방서비스권역을 도출하여 평가하였는데, 골든타임은 5분[35, 47, 62], 3분[48], 2분[63]으로 설정하였다. 등급화하여 평가한 연구에서는 시간을 고려하여 3분, 5분, 10분을 기준으로 하거나[42], 거리를 중심으로 1,400m, 2,000m를 기준으로 하였다[31]. 이때, 모든 도로에 50km/h[47] 및 60km/h[35]와 같은 일정한 속도를 설정하거나, 도로유형에 따라 주간선도로는 45km/h, 이면도로는 30km/h로 설정하기도 하였다[42]. 한편, 500m, 1km, 2km를 반경으로 군집분석을 활용하거나[36], 0.5km, 1km, 2km, 4km를 기준으로 버퍼분석을 활용하여 5등급화하기도 하였다[50]. 소방차량은 도로망을 통해 화재현장으로 이동하기에 실제 도로망을 기반으로 소방서비스 권역을 파악할 수 있는 네트워크 분석이 적합한 평가방법이라고 판단하였다. 이때, 플래시 오버는 화재 발생 이후 5~8분 사이에 발생한다고 밝혀진 화재성장곡선과 심정지 환자는 4~6분 사이에 응급처치를 받아야 신경손상 없다고 언급한 연구에 따라[47], 5분을 골든타임으로 설정하였다. 차량속도는 각 나라나 지역마다 도로의 제한속도가 다르기에, ArcGIS 내부의 기본 설정값을 활용하여 소방차량이 화재현장에 도착하는데 걸리는 시간을 평가하였다.

세 번째로, 피난 위험 감소 시설물에는 학교, 대피소, 관공서 등이 포함되며, 이 시설들의 화재위험 경감성 평가방법은 Table 14.와 같이 정리된다. GIS 공간분석기법인 네트워크 분석을 통해 대피소 서비스 영역을 도출하여 평가하는 것이 일반적이거나, 대피시간 기준은 5~25분으로 다양하다. 대피시간을 도보 5분으로 설정한 연구에서는 「민방위기본법」의 대피소 설치기준[55-56] 및 국가재난정보센터의 대피소 설치 현황[57]을 기반으로 하였다. 또한, E-30 대피계

Table 13. Fire station assessment methods and criteria used in previous studies

No.	Assessment method	Assessment criteria
[31]	Network analysis	• High: more than 2km from fire station • Moderate: 1.4km~2km from fire station • Low: less than 1.4km from fire station
[35]	Network analysis (OD cost matrix)	• 5 minutes by vehicle • Vehicle speed: 60km/h
[36]	Clustering analysis (Hotspot)	• Radius: 500m, 1km, 2km from fire station
[42]	Network analysis (allocate)	• 3, 5, 10 minutes by vehicle • Vehicle speed: 45km/h for principal arterial road, 30km/h for local road
[47]	Network analysis (service area)	• 5 minutes by vehicle • Vehicle speed: 50km/h
[48]	Network analysis	• 3 minutes by vehicle
[50]	Buffer analysis	• 0.5km, 1km, 2km, 4km from fire station
[62]	Network analysis (OD cost matrix)	• 5 minutes by vehicle
[63]	Network analysis (service area)	• 2 minutes by vehicle

Table 14. Evacuation risk reduction facilities assessment methods and criteria used in previous studies

No.	Assessment method	Assessment criteria
[55]	Network analysis (service area)	• 5-minute walk (Walking speed: 1.3m/s for adults)
[56]	Network analysis (service area)	• 5-minute walk (Walking speed: 2m/s for ages 15~65)
[57]	Network analysis (service area)	• 5-minute walk (Walking speed: 1.3m/s for ages 20~39)
[58]	Network analysis (service area)	• 25-minute walk (Walking speed: 1.38m/s for adults)
[59]	Network analysis (service area, OD cost matrix)	• 25-minute walk (Walking speed: 1.38m/s for adults)
[60]	Buffer analysis	• 15-minute walk (Walking speed: 1.38m/s for adults)
[61]	Coverage analysis	• 7.5-, 15-, and 30-minute walk (Walking speed: 1.11m/s for ages 15~49)

획에 따라 도보 25분으로 설정한 연구도 있다[58-59]. 이때 보행속도는, 아동은 1.08m/s, 일반성인은 1.38m/s, 노약자는 0.73m/s로 설정하거나[58-60], 경제활동인구를 기준으로 일반인과 재난약자 각각 2m/s, 1m/s를 적용하였다[56]. 한편, 보행자 유형별 보행속도에 따라 15분을 기준으로 버퍼분석을 활용하거나[60], 연령별 보행속도를 세분화하여 7.5분, 15분, 30분을 기준으로 커버리지 분석을 하기도 하였다[61]. 본 연구에서는 화재 발생 시 대피자들은 피난위험감소시설까지 도보로 이동하기 때문에 도로망을 토대로 접근성을 분석하는 네트워크 분석이 적합한 평가방법으로 판단하였다. 이때, 법적기준인 「민방위기본법」에서 명시한 대피소 설치기준과 국가재난정보센터의 대피소 설치 현황을 바탕으로 도보 5분을 네트워크 분석의 기준으로 설정하였으며, 보행속도는 일반적인 성인의 평균 보행속도를 반영하여 1.38m/s로 설정하였다.

4.2. 산업단지 화재위험도 평가방법 종합 및 적용

앞서 4.1.절에서 지표별로 도출된 적합한 화재위험도 평가방법들의 통합은 지역안전지수를 준용하여 수행되었다. 통합방법을 검증하기 위해 인천 남동공단 산업단지를 대상으로 Esri사의 ArcGIS Pro를 사용하여 검증을 수행하였다.

우선, GIS를 활용하여 인천 남동공단 산업단지의 화재위험도를 분석하기 위해 앞서 3장에서 선정된 평가지표들에 대한 공간 DB 구축을 진행하였다. 각 지표들에 대한 공간정보 데이터는 국토교통부에서 운영 중인 국가공간정보포털 및 공공데이터포털 등을 통해 구축하였다. 지역경계, 도로, 건물 등 기본공간정보를 제외한 데이터들은 도로명 주소나 X, Y 좌표가 포함된 스프레드시트로 제공되고 있어 GIS 내 지오코딩(Geocoding) 도구를 통해 주소 데이터를 위도, 경도 좌표 값으로 치환하여 포인트 데이터(point)로 확보하였다.

다음으로, 이와 같이 구축된 공간데이터들은 앞서 4.1절에서 도출한 위해, 취약, 경감의 평가 분야별 지표들의 세부 평가 기준(Table 6.)에 맞춰 분석하였다. 첫 번째로, 위해지표는 평가방법에 따라 도출

된 점수를 5단계로 등급화하여 시각화하였다. 두 번째로, 취약지표는 건물 밀도와 노후건물 비율의 각 평가방법에 맞게 필드 계산 도구를 사용하여 건물밀도 및 노후도를 계산하고 그 결과 값을 시각화하였다. 소방차 접근성 및 화재위험 증가시설물은 각 기준에 맞게 버퍼(Buffer) 도구를 사용하여 주변 반경의 위험도를 산정하였다. 세 번째로, 경감지표는 소방서 및 119안전센터와 피난위험 감소시설물을 기준으로 네트워크(Network) 분석을 진행하고, 소방용수시설은 버퍼 분석을 실시하여 그 결과를 시각화하였다. 이와 같은 평가방법을 활용하여 구축한 각 지표별 화재위험 지도는 Table 15.와 같다.

마지막으로, 평가분야별(위해지표, 취약지표, 경감지표)로 도출된 화재위험점수를 종합하여 인천 남동공단 산업단지의 최종 화재 취약 지역을 도출할 수 있었는데, 이는 다음과 같은 과정을 통해 수행되었다. 우선, 벡터 분석으로 진행된 폴리곤 데이터들을 래스터 데이터로 변환하였다. 다음으로 GIS의 래스터 계산기(Raster Calculator) 도구를 이용하여 각 평가지표들의 픽셀별 래스터 값을 종합하여 픽셀당 총 래스터 값(Value)을 계산하였다. 이때, 위해지표의 값은 화재발생 건수에 해당하는 점수를, 취약지표의 값은 건물 밀도, 노후 건물 비율, 소방차 접근성, 화재 위험 증가 시설물에 해당하는 점수를, 경감지표의 값은 소방용수시설, 소방서 및 119안전센터, 피난 위험 감소 시설물에 해당하는 점수를 더하여 평가분야별 점수를 구하였다. 평가분야별 점수의 통합은 화재발생 가능성과 피해를 증가시키는 위해지표 및 취약지표의 값은 더하고, 화재 발생의 피해를 줄일 수 있는 경감지표의 값은 빼서 픽셀별 최종 화재위험점수를 도출하였다. 이때, 평가분야별 가중치는 지역안전지수를 준용하여 위해지표 50, 취약지표 20, 경감지표 30과 같은 평가체계 구축 식에 따라 계산되었으며, 세부지표 간의 가중치는 Table 6.과 같이 설정하였다. 각 지표별 평가점수 통합 식은 Table 16.과 같이 요약되며, 이를 통해

Table 15. Fire risk assessment map for each indicator

Number of fire occurrences	Building density
Old building ratio	Accessibility of fire engines
Fire risk increasing facilities	Fire hydrant
Fire station	Evacuation risk reduction facilities

Table 16. Final fire risk score calculation formula

Final Fire risk score
$0.5 * Hazard\ score + 0.2 * Vulnerability\ score - 0.3 * Reduction\ score$

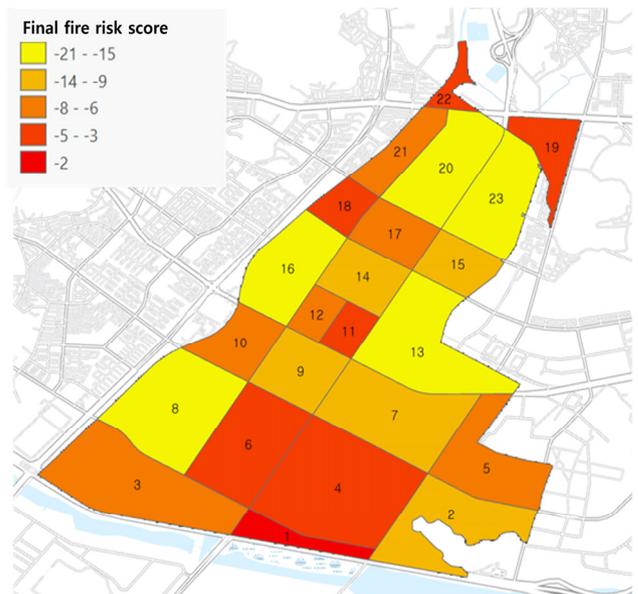


Fig. 2. Final fire risk assessment map

종합된 픽셀 값의 총합을 활용하여 픽셀별 화재위험점수가 도출되었다. 구역별 화재위험도는 zonal statistics 도구를 활용하여 앞서 도출된 픽셀별 화재위험점수를 평균화하여 구역별 화재위험도를 등급화하였다. 결과적으로, 최종 1등급에서 5등급으로 구성된 화재위험지도를 구축하고 시각화하였는데, 이는 Fig. 2.와 같다. 이처럼, 본 연구에서 개발한 산업단지에 특화된 화재위험도 평가체계를 인천 남동공단 산업단지에 적용하여 검증하는 과정을 통해 산업단지 내의 화재위험 취약지역을 5단계로 식별하고 시각화 할 수 있는 가능성을 제시하였다.

## 5. 결론

산업단지는 다양한 시설과 장비, 원자재를 포함하고 있으며, 대규모 인력이 근무한다. 따라서 산업단지는 화재가 발생할 경우 심각한 재산 손실 및 인명 피해를 초래할 위험이 있으며, 환경오염의 위험성도 존재한다. 이에, 본 연구에서는 산업단지 내 화재의 심각성을 인식하여 산업단지의 특성을 고려한 체계적이고 구체적인 화재위험도 평가 체계를 선정하고 개발하였다. 본 연구는 국내외 선행연구를 기반으로 수집된 도시 화재위험도 지표를 산업단지 적용 적합성 및 데이터 구득 가능성 등을 고려하여 산업단지 화재위험도 평가지표를 도출하고, 기존의 화재 관련 평가제도를 고려하여 위해지표, 취약지표, 경감지표로 세분화하였다. 또한, 기존의 화재 관련 평가제도 및 연구, 법적정의를 기반으로 도출한 각 지표별 평가방법의 통합을 인천 남동공단 산업단지를 대상으로 적용하여 본 연구에서 제안한 산업단지 화재위험도 평가체계의 가능성을 검증하였다. 결론적으로, 기존의 건축물 단위의 화재위험평가를 넘어 산업단지 단위의 화재위험 취약지역을 5단계로 식별하고 시각화할 수 있는 가능성을 제시하였다.

본 연구는 기존에 없던 산업단지에 특화된 화재위험도 평가체계를 제안하여 산업단지의 화재위험도를 정량적이고 체계적으로 평가하는 방안을 제시했다는 점에서 의의를 가진다. 이때, 수집된 500개 이상의 평가지표들을 기반으로 산업단지 적합성과 국내 공공데이터의 구득가능성을 고려하여 산업단지에 특화된 화재평가지표를 선정하여 보다 체계적이고 실질적인 화재안전 대책을 수립하는 데 기여하였다는 점에서 중요하다. 특히, 국내 실정에 맞는 법규 및 평가제도를 기반으로 위해지표, 취약지표, 경감지표와 같은 평가기준을 제시하여 화재평가지표들의 화재발생 가능성, 화재피해 증가요인, 화재피해 감소요인을 명확히 하였다. 또한, 본 연구에서 도출한 화재위험지도를 통해, 각 단계별로 구체적인 예방대책을 수립할 수 있었다. 높은 단계의 위험도를 나타낸 지역은 우선적으로 소방차 접근성 개선을 위한 도로정비, 소방용수시설 추가 설치 등의 실질적인 화재 대비책을 강화하는 방안을 수립하고, 중간 단계의 위험도를 보이는 지역은 기존의 소방시설 유지보수와 정기 안전점검 등과 같은 화재 예방 대책을 수립할 수 있다. 낮은 위험도의 지역은 현재의 안전 상태를 유지하기 위해 지속적인 모니터링을 기반으로 위험점수의 변동 현황을 관리할 수 있다. 이처럼, 본 연구는 산업단지의 화재 안전 관리와 정책 수립에 있어 지자체 및 정부에 중요한 데이터를 제공하며, 노후화된 산업단지의 위험요소를 체계적으로 개선할 수 있는 방안을 제시한다.

본 연구의 한계점은 다음과 같다. 우선, 본 연구는 화재취약점수 통합 시에 지표 간 가중치를 고려하지 못했다는 한계가 있으며, 이를 고려한 후속연구가 요구된다. 그럼에도 불구하고, 전반적인 위험 수준을 파악할 수 있기에 향후 정밀 평가를 위한 출발점으로서의 역할을 하며 가중치를 설정하는데 필요한 기초를 마련했다는 점에서 중요하다. 다음으로, 단일 산업단지 내의 화재위험지역을 식별하였기에 산업단지별 특수성(오일, 가스, 특수제조 등)을 고려하지 못했다는 한계점이 있다. 향후, 본 연구에서 개발된 평가체계를 다양한 산업 단지에 적용할 때, 이를 반영한다면 더욱 정밀한 평가가 가능할 것으로 기대된다. 마지막으로, 데이터 구득이 가능한 공간정보에 국한된 지표만을 사용하여 산업단지의 화재위험도를 평가하였다는 한계점이 존재하기에 추후 산업단지 단위의 다양한 공공데이터가 제공된다면 더 정확하고 상세한 화재위험도 평가가 가능할 것으로 기대된다.

## Acknowledgement

본 연구는 과학기술정보통신부 한국전설기술연구원 연구 운영비 지원 (주요사업) 사업으로 수행되었습니다. (과제번호 20240189-001, 산업공단 초고속 화재 예측·제어·대응기술 개발)

## References

- [1] 이동혁, 유병태, 화재규모에 따른 화학공장의 내화구조 적용에 대한 연구, 한국가스학회지, 제22권 제5호, 2018.10, pp.46-52. // (D.H. Lee, B.T. Yoo, A study on fireproofing application by fire magnitude, Journal of the Korean Institute of Gas, 22(5), 2018.10, pp.46-52.)
- [2] 이의평, 전자공장 화재의 다수 사상자 발생원인 분석, 한국화재소방학회 논문지, 제33권 제4호, 2019.08, pp.130-139. // (E.P. Lee, Analysis of the causes of multiple casualties in an electronics factory fire, Fire Science and Engineering, 33(4), 2019.08, pp.130-139.)
- [3] 서동현, 한우섭, 최이락, 화학공장 화재·폭발 사고사례의 시스템적 원인분석에 관한 연구, 안전보건공단 산업안전보건연구원, 2020. // (D.H. Seo, U.S. Han, I.R. Choe, A study on the systematic cause analysis of fire and explosion accidents in chemical plants, Occupational Safety and Health Research Institute, 2020.)
- [4] 민세홍, 허원일, 필름제조 공정의 착화 위험성에 관한 연구, 한국화재소방학회 논문지, 제25권 제3호, 2011.06, pp.107-112. // (S.H. Min, W.I. Heo, A study on firing risk assessment of film manufacturing process, Fire Science and Engineering, 25(3), 2011.06, pp.107-112.)
- [5] 김형준 외 3인, 주조공장 집진설비의 화재발생 사례 연구, 한국화재감식학회 학회지, 제12권 제3호, 2021.09, pp.63-75. // (H.J. Kim et al., A case study on the fire occurrence of the dust collector, Journal of Fire Investigation Society of Korea, 12(3), 2021.09, pp.63-75.)
- [6] 조규환, 전기수, 안재권, 석유화학 플랜트 시설물의 화재 온도분포 특성에 관한 해석적 연구, 한국방재학회논문집, 제23권 제1호, 2023.02, pp.99-105. // (G.H. Cho, K. Jeon, J. Ahn, Analytical study on fire temperature distribution characteristics in petrochemical plant facilities, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 23(1), 2023.02, pp.99-105.)
- [7] 강현, 권오상, 실물실험을 통한 플랜트 시설물의 화재영향성 분석, 한국화재소방학회 논문지, 제37권 제1호, 2023.02, pp.90-99. // (H. Kang, O.S. Kweon, Analysis of the effect of fire on plant facilities through real fire test, Fire Science and Engineering, 37(1), 2023.02, pp.90-99.)
- [8] 이종호 외 3인, 산업단지 화재위험도 평가지표 개발을 위한 공장 업종별 재산피해 분석, 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집, 제43권 제1호, 2023.04, p.825. // (J.H. Lee et al., Property damage analysis by factory type for development of industrial complex fire risk assessment index, Proceedings of Spring Annual Conference of AIK, 43(1), 2023.04, p.825.)
- [9] 진복권, 정수일, 아파트형 공장 구획 공간 화재시 Flash Over 예측과 Sprinkler RTI 작동특성, 대한안전경영과학회지, 제5권 제1호, 2003.03, pp.1-12. // (B.K. Jin, S.I. Jung, Prediction of flash over and characteristics

- operation of sprinkler rti in apartment fire, *Journal of Korea Safety Management & Science*, 5(1), 2003.03, pp.1-12.)
- [10] 오찬욱, 오윤석, 최준호, 방화구획 완화에 따른 PCB 공장의 화재위험 평가 및 스프링클러 요구살수유량 산정을 통한 기존개선안에 관한 연구, *한국화재소방학회 논문지*, 제33권 제2호, 2019.04, pp.56-62. // (C.W. Oh, R.S. Oh, J.H. Choi, A study on a PCB manufacturing plant's fire risk assessment due to the mitigation of fire protection zone and an improvement way through estimation of sprinkler demand water flow rate, *Fire Science and Engineering*, 33(2), 2019.04, pp.56-62.)
- [11] 이종호 외 4인, 머신러닝 모델을 활용한 산업단지 화재 재산피해 크기 예측, *한국생태환경건축학회지*, 제24권 제2호, 2024.04, pp.97-106. // (J.H. Lee et al., Predicting the size of fire property damage in an industrial complex using a machine learning model, *KIEAE Journal*, 24(2), 2024.04, pp.97-106.)
- [12] 손광태 외 3인, 화재 피난시뮬레이션을 통한 MLCC 사업장 클린룸의 위험성 평가, *한국화재소방학회 논문지*, 제35권 제2호, 2021.04, pp.67-73. // (K.T. Son et al., Risk assessment of a MLCC plant through fire and evacuation simulations, *Fire Science and Engineering*, 35(2), 2021.04, pp.67-73.)
- [13] 이인식, 김영희, 최재욱, EPS 공정의 화재 시뮬레이션을 통한 위험성 분석, *한국정보기술학회논문지*, 제20권 제11호, 2022.11, pp.39-47. // (I.S. Lee, Y.H. Kim, J.W. Choi, A risk analysis through fire simulation of EPS process, *Journal of Korean Institute of Information Technology*, 20(11), 2022.11, pp.39-47.)
- [14] 남기태, 이두희, 최두찬, 화재모델링을 통한 석유화학 플랜트 시설물의 화재 위험성 분석, *한국화재소방학회 논문지*, 제36권 제6호, 2022.12, pp.131-141. // (G.T. Nam, D.H. Lee, D.C. Choi, Fire risk analysis of petrochemical plant facilities through fire modeling, *Fire Science and Engineering*, 36(6), 2022.12, pp.131-141.)
- [15] 황의홍, 권오상, 산업단지 내 공장의 화재위험요인 선별을 위한 관련법령 및 문헌분석, *한국화재소방학회논문지*, 제37권 제5호, 2023.10, pp.58-70. // (E.H. Hwang, O.S. Kweon, An analysis of related laws and literatures to identify fire risk factors for factories in industrial complexes, *Fire Science and Engineering*, 37(5), 2023.10, pp.58-70.)
- [16] 최준호, 화재안전사고 지역안전지수 향상을 위한 개선방안 연구, *울산 발전연구원*, 2016. // (J.H. Choi, A study on the improvement plan of local safety index for fire-safety accident, *Ulsan Research Institute*, 2016.)
- [17] 박창열, 제주지역 지역안전지수 산정방법의 개선방안, *제주발전연구원*, 2016. // (C.Y. Park, Improving estimation methods of regional safety index in Jeju, *Jeju Development Institute*, 2016.)
- [18] 이병기, 고경훈, 2017년 세종시 지역안전지수 분석 및 개선방안, *한국지방행정연구원*, 2018. // (B.K. Lee, G.H. Go, A study on the analysis and improvement plans for the 2017 local safety index in Sejong City, *Korea Research Institute for Local Administration*, 2018.)
- [19] 양철수, 삶의 질 제고를 위한 지역안전지수 향상 방안, *광주전남연구원*, 2017. // (C.S. Yang, A study on the improvement plans of the local safety level index for enhancing quality of life, *Gwangju Jeonnam Research Institute*, 2017.)
- [20] 조상필, 신동훈, 지역안전지수 산정 방식의 문제점과 개선 방안, *광주 전남연구원*, 2018. // (S.P. Cho, D.H. Shin, A study on the issues and improvements of the local safety index calculation method, *Gwangju Jeonnam Research Institute*, 2018.)
- [21] 충청남도, 지역안전지수 향상 방안 연구용역 최종보고서, 2018. // (Chungcheongnam-do, A study on the improvement method of the local safety level index, 2018.)
- [22] 조성, 화재분야 지역안전지수 등급산정방법 개선방향, *현안과제연구 Issue Report*, 충남연구원, 2019. // (S. Cho, A study on the improvement plan for the rating system of the local safety index in the fire sector, *ChungNam Institute*, 2019.)
- [23] 봉태호, 전소영, 권재우, 경기도 지역안전지수 분석 및 개선방안, *경기연구원*, 2020. // (T.H. Bong, S.Y. Jeon, J.W. Kwon, Analysis of regional safety index and improvement plan in Gyeonggi province, *Gyeonggi Research Institute*, 2020.)
- [24] 황희연 외 6인, 도시 재해위험도 평가 모형 연구-화재, 시설, 피난위험도 중심의 청주시 사례, *한국도시방재학회 논문집*, 제1권 제2호, 2001, pp.123-137. // (H.Y. Hwang et al., Empirical application for the urban disaster risk assessment: fire, facility and escape cases in Cheongju city, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 1(2), 2001, pp.123-137.)
- [25] 윤상복, 류태창, 김형보, Maxmin 모형과 Transformation Topsis 모형을 이용한 지역 위험도 평가, *한국데이터분석학회지*, 제9권 제3호, 2007.06, pp.1457-1469. // (S.B. Yoon, T.C. Ryu, H.B. Kim, Evaluation of urban disaster for disaster prevention and public safety using Transformation Topsis model and Maxmin model, *Journal of the Korean Data Analysis Society*, 9(3), 2007.06, pp.1457-1469.)
- [26] S. Li, R.A. Davidson, Parametric study of urban fire spread using an urban fire simulation model with fire department suppression, *Fire Safety Journal*, 61, 2013.10, pp.217-225.
- [27] A. Cantizano et al., Human factors in the model of urban fire spread in Madrid (Spain) focused on the poor population, *Sustainability*, 14(8), 2022.04, 4486.
- [28] 고정석 외 4인, 화재예측을 위한 건물객체의 속성정보 융합에 관한 연구, *한국통신학회논문지*, 제45권 제7호, 2020.07, pp.1219-1227. // (K.S. Ko et al., A study on convergence of attribute information of building objects for fire prediction, *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 45(7), 2020.07, pp.1219-1227.)
- [29] 강영욱, 서울시 방재지도 작성방안 연구 -화재위험지도를 중심으로-, *서울시정개발연구원*, 2004. // (Y.O. Gang, Guideline for construction of disaster vulnerability map in Seoul: Mapping for fire hazard assessment, *Seoul Development Institute*, 2004.)
- [30] M. Asiddao, V. Bongolan, Agent-based fire-spreading model in a dense urban community, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 2021, pp.35-40.
- [31] M. Srivanit, Community risk assessment: spatial patterns and GIS-based model for fire risk assessment - A case study of Chiang Mai municipality, *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 8(2), 2011, pp.113-126.
- [32] K. Himoto, T. Tanaka, Physics-based modeling of fire spread in densely-built urban area and its application to risk assessment, *Monografias de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas, Químicas y Naturales de Zaragoza*, 34, 2010, pp.87-104.
- [33] 주홍준 외 3인, 빅데이터를 활용한 건축물 화재위험도 평가 지표 결정, *한국건축사공학회지*, 제22권 제3호, 2022.06, pp.281-291. // (H.J. Joo et al., Determination of fire risk assessment indicators for building using big data, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 22(3), 2022.06, pp.281-291.)
- [34] 김진택, 엄정섭, GIS 공간통계를 이용한 도심화재예측지도 제작기법 탐색, *한국화재소방학회 논문지*, 제21권 제2호, 2007.06, pp.14-23. // (J.T. Kim, J.S. Um, The urban fire prediction mapping technique based on gis spatial statistics, *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, 21(2), 2007.06, pp.14-23.)
- [35] 임정훈, 김원주, 포항시 화재 취약지역 예측 및 이에 따른 행정구역별 화재 피해 등급 측정, *한국콘텐츠학회논문지*, 제21권 제4호, 2021.04, pp.166-176. // (J.H. Lim, H.J. Kim, Pohang city fire vulnerable area prediction and fire damage rating measurement by administrative district, *The Journal of the Korea Contents Association*, 21(4), 2021.04, pp.166-176.)
- [36] 손민수 외 4인, 지역단위 화재 위험도 저감의 고양시 경제적 파급효과 분석, *한국산학기술학회 논문지*, 제22권 제2호, 2021.02, pp.685-693. // (M.S. Son et al., Analyzing the economic impact of the fire risk reduction at regional level in Goyang city, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 22(2), 2021.02, pp.685-693.)
- [37] Y.A. Hermawan, L. Warlina, M. Mohd, GIS-based urban village regional fire risk assessment and mapping, *International Journal of Informatics, Information System and Computer Engineering*, 2(2), 2021.12, pp. 31-43.
- [38] 강양석, 기성 시가지의 재해 위험 요소, *국토계획*, 제33권 제1호, 1998.02, pp.99-114. // (Y.S. Kang, Disastrous urban hazard factors in the old built-up area, *Journal of Korea Planners Association*, 33(1), 1998.02, pp.99-114.)
- [39] 이슬지, 이지영, GIS 기반 중첩기법을 이용한 소방서비스 취약지역 분석, *한국측량학회지*, 제29권 제1호, 2011.02, pp.91-100. // (S.J. Lee, J.Y. Lee, Vulnerability analysis on fire service zone using map overlay method in GIS, *Journal of the Korean Society of Survey, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, 29(1), 2011.02, pp.91-100.)
- [40] 김정근 외 3인, 전통시장 화재 발생 및 확대 위험요인에 관한 연구, *한국재난정보학회 논문집*, 제17권 제1호, 2021.03, pp.60-67. // (J.G. Kim et al., A study on the risks factors of fire occurrence and expansion for traditional markets, *Journal of the Korean Society of Disaster Information*, 17(1), 2021.03, pp.60-67.)
- [41] 박채운, 이주형, 기성시가지 위험도 평가를 통한 재해피해 저감방안:

- 성남시 기성시가지(수정구·중원구) 일원을 중심으로, 국토계획, 제45권 제6호, 2010.11, pp.191-208. // (C.U. Park, J.H. Lee, Analyzing the measures of decreasing disaster damage through assessing the risk of built up area -Focused on built-up areas(Sujeong-gu, jungwon-gu) of Seongnam city in Korea-, Journal of Korea Planning Association, 45(6), 2010.11, pp.191-208.)
- [42] 최우혁, GIS를 이용한 도시화재연구 -강남구를 사례지역으로-, 지리학논총, 34, 1999.08, pp.49-66. // (W.H. Choi, A study on city fire disaster using GIS -Using Kangnam district as an example-, The Institute for Korean Regional Studies, 34, 1999.08, pp.49-66.)
- [43] 황중아, 강지연, 김승주, 서울시 도시화재 발생의 공간분석 및 도시쇠퇴 특성과의 관계, 주택도시연구, 제10권 제3호, 2020.12, pp.1-20. // (J.A. Hwang, J.Y. Kang, S.J. Kim, A study on the spatial characteristics of urban fire and its relationship with the spatiality of urban decline in Seoul, SH Urban Research & Insight, 10(3), 2020.12, pp.1-20.)
- [44] P.B. Juliá, T.M. Ferreira, H. Rodrigues, Post-earthquake fire risk assessment of historic urban areas: A scenario-based analysis applied to the historic city centre of Leiria, Portugal, International Journal of Disaster Risk Reduction, 60, 2021.06, 102287.
- [45] 김지영 외 3인, 쇠퇴지역과 도시지역의 재난 취약요인 비교·분석, 디지털콘텐츠학회논문지, 제21권 제11호, 2020.11, pp.2021-2032. // (J.Y. Kim et al., A comparative analysis of disaster vulnerability factors between declining areas and urban areas, Journal of Digital Contents Society, 21(11), 2020.11, pp.2021-2032.)
- [46] 김성재 외 3인, GIS를 이용한 화재진압 취약성 지도 제작 -대구광역시 달서구를 사례로-, 한국지리정보학회지, 제18권 제3호, 2015.09, pp.11-20. // (S.J. Kim et al., Producing firefighting vulnerability maps using GIS -A case study of Dalseo-gu, Dae-gu-, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 18(3), 2015.09, pp.11-20.)
- [47] 장경은 외 4인, GIS 네트워크 분석을 활용한 중구 화재 취약 지역 분석, 한국생태환경건축학회지, 제21권 제6호, 2021.12, pp.79-86. // (K.E. Jang et al., Jung-gu fire vulnerable area analysis using GIS network analysis, KIEAE Journal, 21(6), 2021.12, pp.79-86.)
- [48] 김항배, 김동문, 오승훈, GIS 공간분석기법을 적용한 화재경제지구 설정과 소방서의 적정위치 평가에 관한 연구: 서울시 주거밀집지역을 중심으로, 대한토목학회논문집, 제22권 제4D호, 2002.07, pp.607-616. // (H.B. Kim, D.M. Kim, S.H. Oh, A study on evaluating a disaster-vulnerable area and locating optimal emergency facilities based on GIS spatial analysis techniques, Journal of the Korean Society of Civil Engineers D, 22(4D), 2002.07, pp.607-616.)
- [49] 유환희 외 3인, 지형공간정보체계에 의한 도시지역 재해위험도 평가, 대한공간정보학회지, 제13권 제3호, 2005.09, pp.41-52. // (H.H. Yoo et al., Disasters risk assessment of urban areas by geospatial information systems, Journal of Korean Society for Geospatial Information Science, 13(3), 2005.09, pp.41-52.)
- [50] H. Xiao, Y. Zhou, H. Zhang, GIS-based fire risk assessment and fire station site selection - Taking Dujiangyan city as an example, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 608, 2020, 012008.
- [51] I. Wadembere, J. Apaco, Urban spatial risk assessment of fire from fueling stations on buildings case study: Lubaga Division, Kampala City, Uganda, Journal of Building Construction and Planning Research, 8(1), 2020.03, pp.57-72.
- [52] 강영욱, 박미라, 서울시 화재위험지도 구축방안에 관한 연구, 한국방재학회논문집, 제5권 제1호, 2005, pp.1-12. // (Y.O. Gang, M.R. Park, Guidelines for the construction of vulnerability map of fire in Seoul, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 5(1), 2005, pp.1-12.)
- [53] 이창길, 김성환, 재난안전 시각지대 분석과 해소방안에 관한 연구, 한국재난정보학회 논문집, 제16권 제3호, 2020.09, pp.611-625. // (C.K. Lee, S.H. Kim, Policy suggestions for minimizing the dead zone of the disaster safety in Korea, Journal of the Korean Society of Disaster Information, 16(3), 2020.09, pp.611-625.)
- [54] 이인아, 오형록, 이준기, 건물별 화재 위험도 예측 및 분석: 재산 피해액과 화재 발생 여부를 바탕으로, 한국빅데이터학회지, 제6권 제1호, 2021.08, pp.133-144. // (I.A. Lee, H.R. Oh, Z.K. Lee, Risk prediction and analysis of building fires -Based on property damage and occurrence of fires-, The Korea Journal of BigData, 6(1), 2021.08, pp.133-144.)
- [55] 김미경 외 3인, 유동인구를 활용한 대피소 수용 능력 분석, 한국측량학회지, 제34권 제1호, 2016.02, pp.1-10. // (M.K. Kim et al., A spatial analysis of shelter capacity using floating population, Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, 34(1), 2016.02, pp.1-10.)
- [56] 강신혜, 네트워크분석을 이용한 대피소 취약지역 분석에 관한 연구, 연세대학교 석사학위논문, 2015. // (S. Kang, A study on the selection of vulnerable area for disaster shelter using network analysis, Master's thesis, Yonsei University, 2015.)
- [57] 박재국, 김동문, 네트워크 분석을 이용한 보행속도에 따른 대피소 서비스 영역 분석, 대한공간정보학회지, 제20권 제4호, 2012.12, pp.37-44. // (J.K. Park, D.M. Kim, Analysis of shelter service areas according to walking speed using network analysis, Journal of the Korean Society for Geospatial Information System, 20(4), 2012.12, pp.37-44.)
- [58] 유환희, 손세련, 진주시 홍수재해용 대피소 적합성 평가, 대한공간정보학회지, 제20권 제3호, 2012.09, pp.91-99. // (H.H. Yoo, S.R. Son, Suitability assessment for flood disaster shelters of Jinju City, Journal of Korean Society for Geospatial Information Science, 20(3), 2012.09, pp.91-99.)
- [59] 손세련, 유환희, 창원시 재해위험지구 대피 적합성 분석, 대한공간정보학회지, 제21권 제3호, 2013.09, pp.27-35. // (S.R. Son, H.H. Yoo, Evacuation suitability assessment of shelters in disaster risk districts of Changwon city, Journal of the Korean Society for Geospatial Information System, 21(3), 2013.09, pp.27-35.)
- [60] 최진호, 주승민, GIS 공간분석 기반의 청주지역 대피소 분포 특성 및 위치 적합성 평가, 지역정책연구, 제25권 제1호, 2014.06, pp.109-120. // (J.H. Choi, S.M. Joo, GIS spatial analysis based on the distribution characteristics and location suitability of emergency evacuation in Cheongju, Journal of Regional Policies, 25(1), 2014.06, pp.109-120.)
- [61] 이소희 외 3인, 도로경사와 연령별 보행속도 차이를 고려한 자연재난 대피소의 입지분석 - 서울시 사례분석, 대한공간정보학회지, 제23권 제2호, 2015.06, pp.69-77. // (S.H. Lee et al., The spatial location analysis of disaster evacuation shelter for considering resistance of road slope and difference of walking speed by age - Case study of Seoul, Korea, Journal of Korean Society for Geospatial Information Science, 23(2), 2015.06, pp.69-77.)
- [62] 유환희, 구슬, 진주시 소방서비스 취약지역 개선을 위한 소방권역 조정, 대한공간정보학회지, 제21권 제1호, 2013.03, pp.19-26. // (H.H. Yoo, S. Koo, Fire district adjustment for improving fire service vulnerable areas in Jinju, Journal of the Korean Society for Geospatial Information System, 21(1), 2013.03, pp.19-26.)
- [63] X.M. Dong et al., Study on urban fire station planning based on fire risk assessment and GIS technology, Procedia Engineering, 211, 2018, pp.124-130.

- 1) 국가화재정보시스템의 화재통계에 따르면 최근 5년 기준(2018~2022) 재산 피해/화재건수당 피해액은 위험물제조소 308,639천원, 발전시설 198,241천원, 창고시설 141,512천원, 공장시설105,531천원으로 상위 1~4위를 차지한다. 평균 재산피해액이 37,032천원임을 감안할 때 매우 높은 피해액이다.
- 2) 최근 5년 기준(2018~2022) 공장시설의 인명피해는 총 940명으로 전체 인명 피해의 9%에 해당한다. 이는 단독주택 22%, 공동주택 19% 다음으로 세 번째로 높은 비율이다.
- 3) 산업단지 노후설비의 안전 및 유지관리에 관한 특별법안(강은미 의원 등 18인. 의안번호 2117635, 2022.09.29)
- 4) 노후국가산업단지 안전 및 지속가능성 지원을 위한 특별법안(김회재 의원 등 10인, 의안번호 2118183, 2022.11.09)
- 5) 혁신적·역동적 新산업공간으로의 전환. 산업단지 혁신 종합대책, 관계부처 합동, 2022.11.03
- 6) 행정안전부, 안전예방정책실, 지역안전지수 <https://www.mois.go.kr/ft/sub/a06/b10/safetyIndex/screen.do>