



산업단지 도로망 구조와 화재 사상자 발생의 연관성 분석

Analyzing the Association between Road Network Structure and Fire Casualty Occurrence in Industrial Parks

이다니엘* · 김서영** · 이종호*** · 손동욱****

Daniel Lee* · Seoyoung Kim** · Jongho Lee*** · Dong-wook Sohn****

* Main author, Ph.D. course, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (daniel@yonsei.ac.kr)

** Coauthor, MS course, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Yonsei Univ., South Korea (seoyoungkim0124@yonsei.ac.kr)

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

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

ABSTRACT

Purpose: This study views fire casualty occurrence in industrial parks not simply as a matter of distance to fire stations, but as an urban-architectural issue shaped by the combined effects of road network structure and industrial location conditions. **Method:** This study examined 1,468 building fire cases that occurred in 41 industrial parks in Busan, South Korea, in 2023. Using GIS, building characteristics, distance to the nearest fire station, and surrounding building density were constructed. Choice and Integration values were then calculated for 400 m, 800 m, and 1200 m radii using DepthmapX. Pearson correlation analysis and binary logistic regression analysis were subsequently conducted to examine the relationships among road network structure, building density, and fire casualty occurrence. **Result:** The results show that Integration was positively correlated with surrounding building density, indicating that industrial facilities tend to be concentrated around highly central road networks. Fire casualty occurrence showed the strongest correlation with nearby building density within a 50m radius, while building density and Integration were significant in the logistic regression analysis. These findings suggest that fire casualty occurrence in industrial parks is closely associated with the spatial concentration of buildings and industrial activities around central roads, rather than being explained solely by individual building characteristics or distance to fire stations.

KEYWORD

산업단지
산업 시설 화재
공간 구문론
로지스틱 회귀분석

Industrial Parks
Industrial Facility Fire
Space Syntax
Logistic Regression Analysis

ACCEPTANCE INFO

Received Jun. 24, 2026

Final revision received Jul. 2, 2026

Accepted Jul. 8, 2026

© 2026. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

산업단지는 국가 및 지역경제의 생산 기반으로 기능하지만, 동시에 대형 작업공간, 위험물 취급, 물류 차량 이동, 공장 간 밀집 등으로 인해 화재 발생 시 피해가 확대될 가능성이 높은 공간이기도 하다[1]. 특히 산업단지는 일반 건축물과 달리 생산공정, 설비, 적재물, 작업자 이동 등이 복합적으로 결합되어 형성되는 특유의 공간구조로 인해, 화재 발생 시 대응과 피난 과정 등에 영향을 미칠 수 있다[2].

화재 사상자 발생은 단순히 화재 발생 여부와 동일한 문제를 넘어, 화재가 발생한 이후 인명피해로 이어지는 도시·건축적 조건을 별도로 검토할 필요성이 있다. 화재 발생은 전기적 요인, 기계적 요인, 부주의, 위험물 취급 등 발화 원인과 관련될 수 있으며[3~5], 화재 발생 건축물의 노후도나 가연성 자재 등과 같은 특성으로 인해 발생하기도 한다[6]. 그러나 화재가 인명피해로 이어지는 과정은 대피 가능성, 주변 건축물 밀도, 소방 차량의 접근성 등 화재 발생 지점의 입지적·공간 구조적 조건과도 밀접하게 관련된다[7~9]. 따라서 화

재 사상자 발생을 이해하기 위해서는 발화 원인뿐 아니라 화재 발생 건축물이 놓인 도시·건축적 공간환경을 함께 검토할 필요가 있다.

이러한 관점에서 산업단지의 도로망 구조는 화재 사상자 발생을 설명하는 중요한 공간적 조건이 될 수 있다. 산업단지 내 공장, 창고, 물류시설, 지원시설은 도로망을 따라 배치되며, 각 시설의 접근성은 원자재 반입, 제품 출하, 작업자 이동, 물류 흐름과 밀접하게 관련된다. 특히 중심성이 높은 도로축 주변에는 대형 공장과 물류시설, 작업자 및 차량 이동이 집중될 가능성이 높다[10]. 이 경우 화재 발생 시 대형 화재의 가능성이 높으며, 노출 인원과 차량 흐름이 증가할 수 있다. 또한 피난 동선과 소방 차량 진입 동선이 중첩되면서 현장 대응 여건이 복잡해질 수 있다.

기존 화재 위험 연구는 주로 건축물의 물리적 특성, 화재 발생 원인, 소방시설, 소방서와의 거리 등을 중심으로 진행되어 왔다[11~13]. 이러한 연구들은 화재 발생 가능성이나 소방 대응 취약성을 설명하는 데 중요한 기초를 제공하였지만, 화재 발생과 피해 규모가 큰 산업단지 내부의 도로망 구조와 주변 공간환경이 화재 사상자 발생 여부와 어떠한 연관성을 갖는지에 대해서는 상대적으로 충분히 논의되지 못하였다. 특히 소방서와의 거리와 같은 단순 거리 기반 접근성으로 산업단지 화재 피해 정도를 살펴보는 연구가 진행되었지만[1,13], 실제 화재 현장 접근은 도로 폭, 연결성, 우회 가능성, 주

변 건물 밀도 등으로 인해 화재 대응 및 사상자 발생 가능성을 충분히 설명하기에는 어려움이 있다[14,15].

이에 본 연구는 대표적인 공간구조 분석 방법론인 공간 구문론을 활용하여 산업단지 도로망 구조와 화재 사상자 발생 여부의 연관성을 분석하는 것을 목적으로 한다[16]. 특히 본 연구는 화재 사상자 발생이 개별 건축물 특성이나 소방서와의 거리만으로 설명되기보다, 도로망 중심성이 높은 구간을 중심으로 형성되는 주변 건축물 밀도와 산업 시설의 입지적 집중이라는 공간조건과 밀접하게 관련될 수 있음을 검토한다. 이를 통해 산업단지 화재 사상자 발생을 개별 건축물의 방재 성능만이 아니라, 주변 밀도, 소방 접근성, 도로망 중심성이 결합된 도시·건축적 공간구조의 문제로 해석하고, 산업단지 계획 및 화재 안전관리에서 주변 공간환경과 도로망 구조를 함께 고려해야 한다는 실증적 근거를 제시하고자 한다.

1.2. 연구의 범위 및 방법

본 연구는 2023년 부산광역시에 위치한 41개 산업단지를 대상으로 한다. 분석 자료는 산업단지 내 화재 및 사상자 위치 데이터 중 건축물 내부에서 발생한 화재 사례를 추출한 1,468건이며, 종속변수는 화재 발생 이후 사상자 발생 여부이다. 독립변수는 건축물 특성, 주변 건물 밀도 및 소방 접근성, 그리고 공간 구문론 기반 도로망 구조 지표의 세 가지 범주로 분류된다.

연구 방법은 크게 공간 구문론을 활용한 도로망 구조 지표 구축과 이항 로지스틱 회귀분석을 통한 연관성 검토 절차로 구성된다. 먼저 산업단지 도로망의 구조적 특성을 분석하기 위해 400m, 800m, 1,200m local 반경별 Choice와 Integration을 산출하였다. 다음으로 건축물 특성만을 포함한 Baseline 모형, 소방서와의 거리 및 주변 건물 밀도를 추가한 산업단지 밀도·접근성 모형, 그리고 각 반경별 공간 구문론 지표를 추가한 모형을 순차적으로 구축하였다. 이를 통해 화재 사상자 발생 여부가 개별 건축물 특성뿐 아니라 주변 밀도, 소방 접근성, 산업단지 내부 도로망 구조와 어떠한 통계적 연관성을 갖는지 분석하였다.

2. 이론적 고찰

2.1. 산업단지 화재 사상자 발생의 도시·건축적 요인

산업단지는 제조·생산, 물류, 창고, 지원시설 등이 집적된 공간으로, 일반적인 주거·상업지역과는 다른 화재위험 특성을 가진다. 산업단지 내 건축물은 생산공정, 가연성 자재, 위험물 저장, 대형 설비, 하역공간, 물류 차량 이동 등과 밀접하게 관련되어 있으며, 이러한 조건은 화재 발생 시 피해 규모를 확대시킬 수 있다[1,4]. 또한 다수의 공장과 지원시설이 일정한 구역 안에 집적되어 있기 때문에, 개별 건축물에서 발생한 화재는 주변 건축물, 도로 이용, 작업자 이동, 물류 흐름과 결합되어 복합적인 위험으로 전개될 가능성이 있다. 따라서 산업단지 화재는 단일 건축물 내부에서 발생하는 개별 사건이라기보다, 산업활동, 건축물 배치, 주변 밀도, 도로망 구조가 결합된 공간적 사건으로 이해할 필요가 있다.

특히 화재 발생 요인과 사상자 발생 요인은 구분해서 이해할 필요

가 있다. Kim et al.의 연구에 따르면, 화재 발생은 용적률, 건물 노후도, 건물 수와 같은 건축물 특성과 관련된 반면, 화재 발생 이후 사상자 발생은 도로 연결성과 소방서 근접성과 같은 네트워크 기반 요인과 더 밀접하게 관련되는 것으로 나타났다[17]. 이는 화재가 사상자 발생으로 이어지는 과정이 단순한 발화 원인만으로 설명되기 어렵고, 화재 당시 건축물 규모와 구조, 대피 가능성, 소방 차량의 접근성, 주변 건물 밀도, 도로 폭, 도로 연결성 등 화재 발생 이후의 대응 및 피난 조건과 밀접하게 관련될 수 있음을 의미한다.

이러한 관점에서 산업단지 내 건축물 화재는 일반 건축물 화재와 구분되는 입지적 조건을 가진다. 일반 건축물의 화재 사상자 발생은 주로 건축물 내부의 피난 여건, 용도, 층수, 수용 인원, 소방시설과의 거리 등 개별 건축물의 물리적·관리적 특성과 밀접하게 관련된다[7~9]. 반면 산업단지 내 건축물은 생산공정, 물류 흐름, 하역공간, 대형 차량 이동, 공장 간 밀집, 산업도로망과 결합된 입지적 특성을 가진다. 따라서 산업단지 화재 사상자 발생은 소방 차량의 접근성과 같은 대응 조건뿐 아니라, 해당 건축물이 산업단지 내부에서 어떤 입지적 위치에 놓여 있는지, 주변에 산업 시설과 건축물이 얼마나 밀집되어 있는지, 그리고 도로망 중심축과 어느 정도 연결되어 있는지에 따라 달라질 수 있다. 즉, 산업단지 화재 사상자 발생은 소방서와의 거리뿐 아니라 산업활동의 집중, 주변 건축물 밀도, 물류·작업자 이동 축 등 건축물의 산업입지 조건과 도로망 구조가 결합되어 나타나는 공간적 결과로 이해할 필요가 있다.

2.2. 산업단지 도로망 구조와 화재 사상자 발생 요인

1) 산업단지 소방 접근성

산업단지 화재 피해를 최소화하기 위해서는 소방서와 화재 현장 간의 단순 거리만으로 소방 접근성을 판단하는 데 한계가 있다. 일반적으로 소방서와의 거리가 가까울수록 현장 도착시간이 짧아질 가능성이 있지만, 실제 화재 대응 과정에서는 도로망의 구조, 도로 폭, 교차로 연결성, 차량 흐름, 우회 가능성 등 다양한 조건이 함께 작용한다[14,18,19]. 또한 도로망 구조는 소방 차량의 진입뿐 아니라 현장 대응과 피난 방향에도 영향을 미친다. 화재 발생 시 소방 차량은 현장 접근 이후 도로 위에서 정차하고, 호스 전개, 장비 배치, 구조 활동을 수행해야 한다. 이 과정에서 충분한 도로 폭과 주변 공간이 확보되지 않으면 진입 활동이 제한될 수 있다. 특히 산업단지는 대형 필지, 공장·창고의 집적, 하역공간, 물류 차량 이동, 외부 적재공간이 도로와 인접하여 형성되는 경우가 많기 때문에, 화재 대응 여건은 단순한 거리보다 산업단지 내부의 공간구조와 도로 이용 특성에 의해 더 크게 제약될 수 있다.

그러나 기존 연구는 도시 전반의 소방 접근성이나 응급차량 진입 가능성을 평가하는 데 초점을 두었을 뿐, 산업단지 내부 도로망 구조가 화재 사상자 발생 여부와 어떠한 연관성을 갖는지에 대해서는 충분히 설명하지 못했다. 또한 Li et al.은 불규칙한 산업단지 도로망 구조와 구조 차량 이동시간을 고려하여 위험물질 취급 산업단지의 소방서 배치 평가 방법을 제시하였지만, 이는 산업단지 내부 도로망의 구조적 특성이 실제 화재 사상자 발생 여부와 어떠한 통계적 연관성을 갖는지를 설명하는 데에는 한계를 보여준다[20].

2) 산업단지 내 산업 시설 입지와 도로망 구조

산업단지의 도로망은 단순히 차량 이동을 위한 교통 기반 시설에 그치지 않고, 산업 시설의 입지와 생산활동을 조직하는 공간적 골격으로 기능한다. 따라서 도로망 구조는 산업 시설의 공간적 배치와 이용 강도를 형성하는 기본 조건이며, 산업단지 내부의 기능적 중심성과 활동 분포를 설명하는 중요한 도시·건축적 요소로 볼 수 있다[21~23].

특히 산업단지 내부의 중심으로 주변에는 공장, 물류시설, 하역공간, 출입구, 차량 이동이 집중될 가능성이 높다[10]. 산업단지 내 도로로는 단지 내 주요 진입 축 또는 내부 이동 축으로 기능할 수 있으며, 대형 차량의 통행, 작업자의 출퇴근 및 이동, 원자재와 제품의 운송이 반복적으로 이루어지는 공간이다. 이에 따라 중심성이 높은 도로 주변에는 상대적으로 규모가 큰 건축물이나 생산·물류 기능이 집중될 수 있으며, 그 결과 주변 건물 밀도와 산업활동의 강도가 함께 높아질 수 있다[24~26]. 이처럼 도로망 중심성은 단순한 통행 가능성이 아니라 산업단지 내부의 입지적 우위와 활동 집중을 반영하는 지표로 해석될 수 있다.

이러한 산업단지 도로망 구조에 따른 입지적 집중은 화재 발생 시 사상자 발생 가능성과도 연결될 수 있다. 중심성이 높은 도로 주변에서 화재가 발생할 경우, 해당 공간은 작업자 이동, 물류차량 흐름, 주변 건축물 밀집이 동시에 나타나는 구역일 가능성이 있다. 이 경우 화재 발생 이후 노출 인원과 이동량이 증가하고, 피난 동선과 소방 차량 진입 동선이 동일한 도로축에 중첩될 수 있다[14]. 또한 건축물이 밀집된 구역에서는 화재 확산 가능성, 대피 공간 부족, 소방 차량의 정차 및 장비 전개 공간 부족 등이 발생할 수 있다. 따라서 도로망 중심성은 산업단지 화재 사상자 발생을 설명할 때 산업활동 집중과 노출 위험을 함께 반영하는 공간 구조적 요인으로 고려될 필요가 있다.

그러나 기존 산업단지 및 화재위험 연구는 주로 개별 건축물의 규모, 용도, 구조, 위험물 취급 여부, 소방시설, 소방서 접근성 등에 집중하여 위험 요인을 설명해 왔다[1,11,27]. 반면 산업단지의 도로망이 산업 시설의 입지와 활동 집중을 어떻게 조직하며, 이러한 도로망 구조가 화재 발생 이후 사상자 발생 가능성과 어떻게 연관되는지에 대한 논의는 상대적으로 부족하였다. 이에 본 연구는 산업단지 도로망을 단순한 교통망이 아니라 산업입지와 활동 집중을 반영하는 공간구조로 해석하고, 도로망의 중심성 및 경로 선택성이 화재 사상자 발생과 갖는 통계적 연관성을 검토한다는 점에서 차별성을 갖는다.

3. 연구 방법

3.1. 연구 대상

본 연구의 공간적 범위는 부산광역시에 위치한 41개 산업단지이다(Fig. 1.). 부산광역시는 제조업, 항만물류, 기계·금속, 조선기자재, 자동차부품 등 다양한 산업 기능이 집적된 지역으로, 산업단지 내부에는 공장, 창고, 물류시설, 지원시설 등이 혼재되어 있다. 이러한 산업단지는 일반 시가지와 달리 대형 필지, 넓은 건축면적, 물류 차량 이동, 작업공간, 하역공간 등이 결합된 공간구조를 가지며, 화재 발생 시 건축물 특성뿐 아니라 주변 건물 밀도와 도로망 구조가

사상자 발생 여부와 관련될 가능성이 있다.

시간적 범위는 2023년으로 설정하였다. 분석 자료는 부산광역시 41개 산업단지 내 화재 및 사상자 위치 데이터 중 건축물 내부에서 발생한 화재 사례 1,567건을 우선 추출하여 구축하였다. 최종적으로 본 연구에서는 이상치 99건을 제외한 부산 산업단지 건물 내 화재 발생 1,468건을 분석 대상으로 설정하였다.

3.2. 변수 설정

1) 종속변수: 화재 사상자 발생 여부

본 연구의 종속변수는 산업단지 내 건축물 화재 발생 이후 사상자 발생 여부로 설정하였다(Table 1.). 사상자가 발생하지 않은 화재는 0, 사상자가 발생한 화재는 1로 구분하였다.

2) 독립변수

독립변수는 세 가지 범주로 구분하였다(Table 1.). 첫째, 화재 기초 변수와 건축물 특성 변수는 화재 발생 건축물의 물리적 속성과 화재 발생 시점의 기본 조건을 반영한다. 둘째, 밀도·접근성 변수는 화재 발생 건축물 주변의 물리적 밀집도와 거리 기반 소방 접근성을 나타낸다. 셋째, 도로망 구조 변수는 공간 구분론을 통해 산출한 산업단지 내부 도로망의 구조적 특성을 의미한다.

먼저, 기초 화재 특성 변수는 화재 발생 신고 월과 신고 시간으로 구성하였다. 해당 변수들은 화재 발생 시점의 계절적·시간적 차이를 고려하기 위한 변수이다. 다음으로, 건축물 특성 변수는 화재 발생 건축물의 물리적 조건과 화재 발생 시점의 기본 특성을 반영하기 위해 선정하였다. 이 중, 건물 건축면적, 건물 높이, 지상 층수는 건축물의 규모와 수직적 특성을 나타낸다. 건축물 구조는 화재 발생 건축물의 구조적 특성을 반영하며, 화재에 취약한 철골 구조 유무로 설정하였다. 건물 연식은 건축물의 노후도를 설명하는 변수로 활용하였으며, 2023년을 기준으로 사용승인 연도와와의 차이로 계산하였다. 이러한 변수들은 화재 발생 이후 대피, 구조, 연소 확대, 내부 공간 이용 조건과 관련될 수 있으므로 기초 화재 특성 변수와 함께 기본 모형의 독립변수로 포함하였다.

밀도·접근성 변수는 화재 발생 건축물 주변의 공간적 조건을 반영하기 위해 설정하였다. 소방서와의 거리는 화재 발생 건축물과 가장 가까운 소방서 간 거리를 GIS를 통해 산출한 변수로, 거리 기반 소방

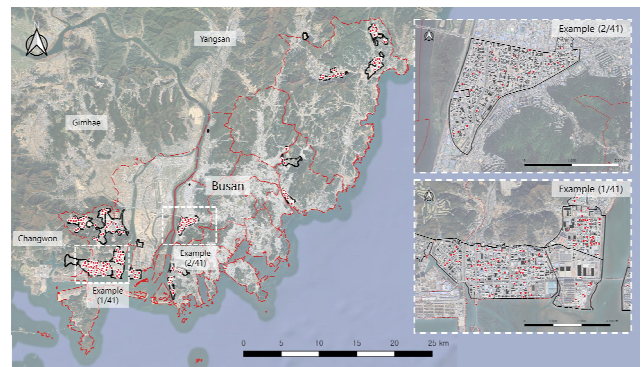


Fig. 1. Location of the fire in the target area (The figure presents examples from two industrial parks among the 41 industrial complexes in Busan)

Table 1. Summary of variables

Variables		Description	Unit	Source
Dependent	Casualty occurrence due to fire accidents	Whether casualties occurred as a result of a fire accident. No casualty=0; casualty occurrence=1	Dummy	Korea Fire Safety Big Data Platform
Independent	Building characteristics	Month	Month in which the fire accident was reported	
		Hour	Hour in which the fire accident was reported	
		Building Area	Footprint area of the building where the fire occurred	Square Meters
		Structure	Dummy variable indicating whether the building where the fire occurred is a steel-structure building. Non-steel structure=0; steel structure=1	Dummy
		Building Height	Height of the building where the fire occurred	Meters
		Above Ground	Number of above-ground floors of the building where the fire occurred	Floors
		Building Age	Years elapsed since building construction	Year
	Density and accessibility	Dist to Station	Distance from the fire-affected building to the nearest fire station	Meters
		Building Density	Number of buildings within a 50, 100, 250m buffer around the fire-affected building	Number
	Road network structure	Road width	Width of the nearest road segment to the fire-affected building	Meters
		Choice r400m	Choice within a 400m local radius	Number
		Integration r400m	Integration within a 400m local radius	Number
		Choice r800m	Choice within a 800m local radius	Number
		Integration r800m	Integration within a 800m local radius	Number
		Choice r1,200m	Choice within a 1,200m local radius	Number
		Integration r1,200m	Integration within a 1,200m local radius	Number

접근성을 나타낸다. 건축물 밀도 변수는 화재 발생 건축물을 기준으로 50m, 100m, 그리고 250m 버퍼를 생성한 뒤, 해당 범위 내 건축물 수를 산정한 변수이다. 이는 화재 발생 지점 주변의 물리적 밀집도를 나타내며, 화재 확산 가능성, 대피 공간, 소방 차량의 진입 및 현장 대응 여건과 관련될 수 있다.

마지막으로, 도로망 구조 변수는 도로 너비와 공간 구문론을 통해 산출한 Choice와 Integration으로 구성하였다. Choice는 도로망 내에서 특정 도로 구간이 여러 경로의 통과 축으로 선택될 가능성을 의미하며, 산업단지 내부의 주요 물류 축, 통과교통, 우회 가능성과 관련된 지표로 해석할 수 있다. Integration은 특정 도로 구간이 도로망 내에서 얼마나 통합적이고 중심적인 위치를 갖는지를 나타내며, 산업단지 내부의 중심도로, 산업활동 집중, 접근성 높은 공간과 관련된 지표로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 400m, 800m, 1,200m local 반경별 Choice와 Integration을 산출하여, 화재 사상자 발생이 근접거리 도로망 구조, 중간 범위 도로망 구조, 상대적으로 넓은 범위의 도로망 구조 중 어느 수준과 더 밀접한 연관성을 갖는지 비교하였다.

이와 같이 본 연구의 변수 설정은 화재 사상자 발생을 개별 건축물 특성만으로 설명하기보다, 주변 건축물 밀도, 소방 접근성, 그리고 산업단지 내부 도로망 구조가 결합된 도시·건축적 조건으로 해석하기 위한 것이다. 따라서 이후 분석에서는 건축물 특성만을 포함한 기본 모형, 밀도·접근성 변수를 추가한 확장 모형, 그리고 반경별 공간 구문론 지표를 추가한 모형을 순차적으로 비교하여 각 변수군의 설명력과 연관성을 검토하였다.

3.3. 연구 방법

1) 공간 구문론(Space Syntax)

공간 구문론(Space Syntax)은 도시·건축 공간의 공간구조를 정량적으로 분석하는 방법으로, 도로망의 연결 관계, 중심성, 접근성, 경로 선택성을 분석하는 데 활용된다[16]. 본 연구에서는 산업단지 내부 도로망 구조가 화재 사상자 발생과 어떠한 관계를 갖는지 확인하기 위해 공간 구문론 기반 도로망 지표를 산출하였다. 산업단지의 도로망은 단순한 교통시설이 아니라 산업 시설의 입지, 물류 이동, 작업자 이동, 소방 차량 접근 및 대피 동선을 조직하는 공간적 기반이므로, 도로망 구조를 정량적으로 분석할 필요가 있다.

본 연구에서 사용한 공간 구문론 지표는 Choice와 Integration이다. Choice는 산업단지 내부에서 주요 물류 축, 통과교통, 우회 가능성과 관련된 지표로 해석할 수 있다. Integration은 산업단지 내부의 중심도로, 산업활동 집중, 접근성 높은 공간과 관련된 지표로 해석할 수 있다.

공간 구문론 분석은 QGIS 도로중심선을 중심으로 Depthmap X 프로그램을 통해 400m, 800m, 1,200m local 반경으로 구분하여 수행하였다. 본 연구에서 세 개의 반경을 설정한 이유는 산업단지 도로망 구조를 단일 범위에서 해석하기보다, 화재 발생 건축물 주변의 근거리 도로망 구조부터 산업단지 내부의 중간 범위 및 상대적으로 넓은 범위의 도로망 구조까지 단계적으로 비교하기 위함이다[28]. 본 연구는 이들 반경별 지표를 비교함으로써 화재 사상자 발생이 건축물 바로 주변의 도로망 구조와 더 관련되는지, 또는 산업단지 내부의 중간·광역적 도로망 구조와 더 관련되는지를 검토하였다.

2) Pearson 상관관계 분석

본 연구에서는 산업단지 도로망 구조를 건축물 밀도와 산업활동 집중을 형성하는 공간구조로 해석하며, 이러한 구조가 화재 사상자 발생 여부와 어떠한 연관성을 갖는지 분석하고자 한다. 이에 따라 먼저, 도로망 구조 변수와 반경별 건축물 수 간의 Pearson 상관계수를 분석하였다(Eq. 1). 이는 산업단지 내 도로망 특성이 산업 시설의 입지적 집중을 형성하고 있는지 확인하기 위함이다.

다음으로, 화재 발생 건축물 주변의 건축물 밀도를 산정하기 위해 화재 사상자 발생 여부와 50m, 100m, 250m 버퍼 내 건축물 수 간의 상관계수를 분석하였다. 이 중 종속변수인 화재 사상자 발생 여부와 의 상관계수가 가장 높은 버퍼 범위를 최종 건축물 밀도 변수로 선정함으로써, 사상자 발생과 가장 밀접하게 관련되는 근접 공간 범위의 밀도 조건을 모형에 반영하고자 하였다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (\text{Eq. 1})$$

3) 로지스틱 회귀분석

본 연구는 분석 방법으로 이항 로지스틱 회귀분석을 활용하였다. 로지스틱 회귀분석은 종속변수가 '0'과 '1'의 두 개 값만 가지는 이분형 변수일 때, 독립변수와 사건 발생 가능성 간의 관계를 분석하는 데 적합한 방법이다[29]. 특히 로지스틱 회귀 분석은 화재 발생, 인명피해 발생, 사고 위험 여부와 같이 종속변수가 발생/미발생의 형태로 구성되는 재난·안전 연구에서, 개별 요인이 사건 발생 가능성에 미치는 영향을 추정하는 데 널리 활용되는 방법론이다[30,31]. 이에 따라 본 연구에서는 건축물 특성, 주변 건물 밀도, 소방 접근성, 도로망 구조 지표가 화재 사고로 인한 사상자 발생 가능성과 어떠한 관련성을 갖는지 분석하였다.

로지스틱 회귀분석은 독립변수의 선행 결함을 로짓 변환을 통해

사건 발생 확률로 변환한다. 이때 사상자 발생 확률은 0과 1 사이의 값을 가지며, 아래의 로지스틱 함수로 나타낼 수 있다(Eq. 2).

$$E(y|x) = \frac{\exp(B_0 + B_1x)}{1 + \exp(B_0 + B_1x)} \quad (\text{Eq. 2})$$

본 연구의 모형은 단계적 비교 방식으로 구성하였다. 첫째, 기본 모형은 신고일, 신고시간, 건물건축면적, 건축물구조, 건물높이, 지상층수, 건물연식 등 건축물 및 화재 발생 조건만을 포함하였다. 이는 개별 건축물 특성만으로 사상자 발생 여부를 어느 정도 설명할 수 있는지를 확인하기 위한 기준모형이다. 둘째, 밀도·접근성 확장 모형은 기본 모형에 소방서와의 거리 및 주변 건물 밀도를 추가하였다. 이를 통해 거리 기반 소방 접근성과 화재 발생 건축물 주변의 물리적 밀집도가 사상자 발생과 관련되는지를 검토하였다. 셋째, 공간 구분론 모형은 밀도·접근성 확장 모형에 400m, 800m, 1,200m local 반경별 Choice와 Integration을 각각 추가하여 구축하였다. 이를 통해 반경별 도로망 구조 지표가 화재 사상자 발생 여부와 갖는 추가적인 연관성을 비교하였다.

본 연구의 단계별 로지스틱 회귀분석은 화재 사상자 발생 여부와 관련된 건축물 특성, 주변 건물 밀도, 소방 접근성, 도로망 구조 간의 통계적 연관성을 검토하기 위한 설명 모형으로 해석한다. 따라서 전체 분류 정확도와 사상자 발생 예측률은 보조적으로 제시하되, 핵심 해석은 모형 간 설명력 변화와 변수별 유의성 및 영향 방향을 중심으로 수행하였다.

4. 연구 결과

4.1. 기초 분석

1) 기술 통계량

본 분석에서 사용된 변수의 기술 통계량은 Table 2.와 같다. 먼저 전체 화재 사례 중 약 27.5%에서 사상자가 발생한 것으로 확인되었

Table 2. Descriptive statistics

Variables			Mean	Min	Max	SD	
Dependent	Casualty occurrence due to fire accidents		0.275	0.000	1.000	0.446	
Independent	Building characteristics	Month		6.125	1.000	12.000	3.194
		Hour		11.155	0.000	23.000	6.321
		Building Area		3,883.056	96.000	66,711.820	5,480.588
		Structure		0.764	0.000	1.000	0.425
		Building Height		16.870	4.500	208.500	17.924
		Above Ground		3.216	1.000	60.000	5.053
		Building Age		16.575	3.000	51.000	8.145
	Density and accessibility	Dist to Station		1,720.888	73.147	5,140.123	1,192.762
		Building Density	Buffer_50m	3.156	1.000	22.000	2.827
			Buffer_100m	10.354	1.000	78.000	9.022
			Buffer_250m	52.084	3.000	316.000	42.957
	Road network structure	Road width		15.826	2.000	40.000	6.708
		Choice r400m		21.138	0.000	760.000	42.222
		Integration r400m		17.162	-1.000	65.764	6.749
		Choice r800m		239.075	0.000	3,767.000	297.558
		Integration r800m		44.149	10.205	122.200	16.940
		Choice r1,200m		878.619	0.000	8,862.000	1,055.157
	Integration r1,200m		79.275	15.164	324.701	33.559	

다. 건축물 특성 변수의 경우, 건물 건축면적의 평균은 3,883.056m²였으며, 최대값은 66,711.820m²로 일부 대규모 산업 시설이 포함되어 있음을 보여준다. 건축물 구조 변수의 평균은 0.764로, 분석 대상 화재 건축물 중 철골 구조 건축물의 비중이 비교적 높은 것으로 해석된다. 건물 높이는 평균 16.870m, 최대 208.500m로 나타났으며, 지상 층수는 평균 3.216층, 최대 60층으로 확인되었다. 건물 연식은 평균 16.575년으로 나타나, 분석 대상 건축물은 신축 건축물부터 50년 이상 경과한 건축물까지 다양하게 분포하는 것으로 확인되었다. 이에 따라 건물 건축면적, 건물 높이, 지상층수는 원자료의 분포가 오른쪽으로 치우쳐 있고 일부 큰 값을 포함할 가능성이 있으므로, 회귀 분석에서 극단값의 영향을 완화하고 변수 분포를 안정화하기 위해 자연로그 변환을 적용하였다.

밀도 및 접근성 변수의 경우, 화재 발생 건축물과 가장 가까운 소방서 간 평균 거리는 1,720.888m였으며, 최소 73.147m에서 최대 5,140.123m까지 분포하였다. 50m 버퍼 내 주변 건물 밀도는 평균 3.156개, 최대 22개로 나타나, 일부 화재 사례는 주변 건축물이 매우 밀집된 환경에서 발생한 것으로 확인되었다. 도로망 구조 변수의 경우, 인접 도로 너비는 평균 15.826m, 최소 2.000m, 최대 40.000m로 나타났다.

2) 공간 구문론 분석 결과

공간 구문론 지표 중 Choice는 분석 반경이 커질수록 평균값이 증가하는 경향을 보였다. Choice r400m의 평균은 21.138, Choice r800m의 평균은 239.075, Choice r1,200m의 평균은 878.619로 나타났다. 이는 분석 대상 산업단지 도로망에서 경로 선택성 또는 통과 가능성이 근거리 반경보다 넓은 반경에서 더 크게 나타나는 경향을 보여준다. 이에 따라 산업단지 내부의 주요 이동 축이나 물류 흐름은 개별 건축물 인접 도로 수준보다는 일정 범위 이상의 도로망 구조 속에서 더 뚜렷하게 형성될 가능성이 있다.

Integration 역시 반경이 커질수록 평균값이 증가하는 경향을 보였다. Integration r400m의 평균은 17.162, Integration r800m의 평균은 44.149, Integration r1,200m의 평균은 79.275로 확인되었다. 이는 산업단지 도로망의 통합성이 매우 근거리 수준보다는 넓은 공간적 범위에서 더 강하게 나타나는 경향을 의미한다. 이러한 결과는

화재 발생 건축물 주변 도로는 개별 건축물 인접 범위에서는 제한적인 통합도를 보일 수 있으나, 분석 반경이 확대될수록 산업단지 내부 도로망 내에서 상대적으로 높은 접근성과 중심성을 갖는 경향을 보일 수 있음을 시사한다.

3) 상관관계 분석 결과

Pearson 상관분석 결과, 도로망 지표 중 하나인 Integration은 50m, 100m, 250m 버퍼 내 건축물 수와 전반적으로 양의 상관관계를 보였다(Table 3.). 400m 범위의 Integration은 50m, 100m, 250m 버퍼 건축물 수와 각각 0.353, 0.410, 0.425의 상관계수를 보였으며, 800m 범위에서는 각각 0.259, 0.357, 0.502, 1,200m 범위에서는 각각 0.238, 0.315, 0.470으로 나타났다. 특히 각 Integration 지표는 50m 버퍼보다 100m 및 250m 버퍼 내 건축물 수와 더 높은 상관관계를 보이는 경향을 보였으며, 250m 버퍼 건축물 수와의 관계가 비교적 강하게 나타났다. 이는 산업단지 내부에서 통합도와 중심성이 높은 도로망 주변에 건축물이 상대적으로 밀집하는 경향이 있음을 의미하며, 도로망 구조가 산업 시설의 입지적 집중과 관련될 수 있음을 시사한다. 이러한 결과는 산업단지 내부 도로망 구조에 따라 산업 시설과 기능이 집중될 수 있다는 기존 논의와도 부합한다[24~26].

다음으로, 종속변수인 화재 사고로 인한 사상자 발생 여부와 건축물 수 변수 간의 Pearson 상관계수를 비교한 결과, 50m 버퍼 내 건축물 수가 가장 높은 상관관계를 보였다(Table 3.). 이에 따라 본 연구에서는 100m와 250m 버퍼 변수를 제외하고, 50m 버퍼 내 건축물 수를 최종 건축물 밀도 변수로 활용하였다. 이러한 결과는 화재 사상자 발생 여부가 광범위한 밀도 조건보다 화재 발생 건축물 인근의 물리적 밀집도와 더 밀접하게 관련될 가능성을 보여준다.

4.2. 로지스틱 회귀 분석 결과

1) 단계적 로지스틱 회귀 분석 결과

단계적 로지스틱 회귀모형의 적합도 비교 결과, 모든 모형의 Omnibus 검정이 통계적으로 유의하게 나타나(p<.001), 각 모형은 화재 사상자 발생 여부와 관련된 요인을 설명하는 데 통계적으로 유

Table 3. Result of the correlation analysis

Variables	Casualty occurrence due to fire accidents	Density and accessibility			Choice r400m	Integration r400m	Choice r800m	Integration r800m	Choice r1,200m	Integration r1,200m
		Buffer _50m	Buffer _100m	Buffer _250m						
Casualty occurrence due to fire accidents	1	0.265**	0.256**	0.214**	0.063*	0.153**	-0.018	0.117**	-0.048	0.120**
Buffer_50m	0.265**	1	0.873**	0.700**	0.188**	0.353**	0.027	0.259**	-0.032	0.238**
Buffer_100m	0.256**	0.873**	1	0.860**	0.200**	0.410**	0.027	0.357**	-0.014	0.315**
Buffer_250m	0.214**	0.700**	0.860**	1	0.180**	0.425**	0.033	0.502**	0.012	0.470**
Choice r400m	0.063*	0.188**	0.200**	0.180**	1	0.639**	0.695**	0.344**	0.446**	0.241**
Integration r400m	0.153**	0.353**	0.410**	0.425**	0.639**	1	0.639**	0.735**	0.579**	0.574**
Choice r800m	-0.018	0.027	0.027	0.033	0.695**	0.639**	1	0.511**	0.863**	0.366**
Integration r800m	0.117**	0.259**	0.357**	0.502**	0.344**	0.735**	0.511**	1	0.610**	0.891**
Choice r1,200m	-0.048	-0.032	-0.014	0.012	0.446**	0.579**	0.863**	0.610**	1	0.509**
Integration r1,200m	0.120**	0.238**	0.315**	0.470**	0.241**	0.574**	0.366**	0.891**	0.509**	1

*p<.05, **p<.01.

Table 4. Comparison of model fit for stepwise logistic regression models

	Model_1	Model_2	Model_3		
	Building characteristics	Building characteristics+ density and accessibility	Building characteristics+density and accessibility+ road network structure		
			R400m	R800m	R1,200m
-2 Log Likelihood	1489.092	1464.944	1459.029	1460.664	1459.571
Nagelkerke R ²	0.215	0.235	0.240	0.239	0.240
Omnibus p-value	***	***	***	***	***

*** p<.001.

의한 모형으로 확인되었다(Table 4.). 건축물 특성만을 포함한 Model 1의 -2 Log Likelihood는 1489.092, Nagelkerke R²는 0.215로 나타났다. 여기에 주변 건축물 밀도와 소방서 접근성 등 환경변수를 추가한 Model 2에서는 -2 Log Likelihood가 1464.944로 감소하고, Nagelkerke R²가 0.235로 증가하였다. 이는 주변 밀도와 소방 접근성 변수가 화재 사상자 발생 여부의 설명력 개선에 일정 부분 기여할 수 있음을 보여준다. 이러한 결과는 화재 사상자 발생이 개별 건축물 특성뿐 아니라 화재 발생 지점의 입지적 조건 및 외부 대응 접근성과도 관련될 수 있다는 기존 연구의 논의와 부합한다.

도로망 구조를 반영한 공간 구분론 지표를 추가한 Model 3에서는 모형 적합도와 설명력이 추가적으로 개선되었다. 400m 반경 모형의 -2 Log Likelihood는 1459.029로 가장 낮았으며, Nagelkerke R²는 0.240으로 나타났다. 800m와 1,200m 반경 모형 역시 각각 Nagelkerke R²가 0.239와 0.240으로 나타나 Model 1과 Model 2보다 높은 설명력을 보였다. 이는 화재 사상자 발생 여부가 단순히 건축물 특성이나 소방서와의 거리만으로 설명되기보다, 화재 발생 지점 주변의 도로망 구조와 공간적 접근성 조건과도 관련될 수 있음을 시사한다.

도로망 구조 변수를 제외한 변수 중에서는 주변 건축물 밀도가 가장 일관된 영향을 보였다. 건축물 밀도 변수는 R400m, R800m, R1,200m 모형 모두에서 p<0.001 수준의 양(+)의 방향으로 유의하였다. 이는 화재 발생 건축물 주변의 건축물 밀도가 높을수록 사상자 발생 가능성이 증가함을 의미한다. 이러한 결과는 산업단지 내 건축물 밀집 구역은 공장, 창고, 작업공간, 물류공간, 외부 적재공간 등이 인접하여 분포할 가능성이 높기 때문에, 대형 화재 가능성과 화재 발생 시 노출 인원과 대응 과정의 공간적 제약이 함께 증가할 수 있음을 시사한다. 반면 소방서와의 거리는 통계적으로 유의하지 않아, 산업단지 내 화재 사상자 발생은 단순한 거리 기반 접근성보다 주변 건축물의 밀집 조건과 더 밀접하게 관련되는 것으로 해석된다.

2) 반경별 공간구조 연관성 분석 결과

반경별 공간구조 관련성 분석 결과, 도로망 구조 변수의 유의성과 방향은 분석 반경에 따라 차이를 보였다(Table 5.). 먼저 Integration은 400m 반경에서 양(+)의 방향으로 통계적으로 유의하게 나타났다(B=0.034, p=0.018, Exp(B)=1.035). 이는 화재 발생 지점 주변 400m 범위에서 도로망 통합도가 높을수록 사상자 발생 가능성이 증가하는 경향이 있음을 의미한다. 반면, 800m와 1,200m 반경의 Integration은 각각 p=0.058, p=0.053으로 나타나 5% 유의수준에서는 통계적으로 유의하지 않았으나, 10% 수준에서는 일정한 경향

성을 보였다. 이러한 결과는 도로망 구조가 화재 대응과 피난 조건에 영향을 미칠 수 있다는 선행 연구의 논의를 실증적으로 뒷받침하며 [14,18], 산업단지 내부의 화재 사상자 발생 여부와 관련된 도로망 구조의 영향이 광역적 연결성보다는 화재 발생 지점 인근의 국지적 공간구조와 더 밀접하게 관련될 수 있음을 시사한다.

Choice의 경우 400m와 800m 반경에서는 통계적으로 유의하지 않았으나, 1,200m 반경에서는 양(+)의 방향으로 유의하게 나타났다(p=0.045, Exp(B)=1.000). 다만 계수와 오즈비의 변화 폭이 매우 작게 나타났기 때문에, Choice의 통계적 유의성은 확인되지만 실질적 효과 크기는 제한적으로 해석할 필요가 있다. 도로 폭은 400m, 800m, 1,200m 모든 모형에서 통계적으로 유의하지 않았다. 이는 화재 사상자 발생 여부가 개별 도로의 물리적 폭보다는 도로망 내 위치, 통합도, 경로 선택성과 같은 공간 구조적 특성과 더 관련될 수 있음을 보여준다.

Hosmer-Lemeshow 검정 결과, 400m, 800m, 1,200m 모형의 p-value는 각각 0.244, 0.915, 0.240으로 모두 0.05보다 크게 나타났다. 이는 예측값과 관측값 간에 통계적으로 유의한 차이가 없음을 의미하며, 세 반경 모형 모두 수용 가능한 적합도를 갖는 것으로 판단된다. 종합하면, 반경별 공간구조 변수 중에서는 400m 수준의 Integration이 가장 명확한 관련성을 보였으며, 1,200m 수준의 Choice 역시 통계적으로 유의한 관련성을 보였다. 이러한 결과는 산업단지 화재 사상자 발생 여부가 개별 건축물의 물리적 특성이나 도로 폭만으로 설명되기보다, 화재 발생 지점 주변의 국지적 도로망 통합성과 광역적 경로 선택성에 의해 추가적으로 설명될 수 있음을 시사한다.

5. 결론

본 연구는 산업단지 화재 사상자 발생을 개별 건축물 내부의 문제나 소방서와의 거리만으로 설명하기보다, 건축물 특성, 주변 건축물 밀도, 소방 접근성, 산업단지 내부 도로망 구조가 결합된 도시·건축적 공간구조의 문제로 해석하고자 하였다. 특히 산업단지는 일반 건축물과 달리 생산공정, 물류 이동, 작업자 이동, 하역공간, 대형 차량 통행이 도로망을 중심으로 조직되는 공간이라는 점에서, 화재 사상자 발생을 이해하기 위해서는 단순한 거리 기반 소방 접근성뿐 아니라 산업활동이 집중되는 도로망 구조와 주변 건축물 밀집 조건을 함께 검토할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구는 2023년 부산광역시 41개 산업단지 내 건축물 화재 1,468건을 대상으로 공간 구분론 분석, Pearson 상관분석, 이항 로지스틱 회귀분석을 수행하였다. 이를 통

Table 5. Result of logistic regression analysis

Variables				B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	
R400m	Building characteristics	Month	-	-	57.440	<0.001***	-		
		Hour	-	-	55.595	<0.001***	-		
		Building Area	-0.081	0.089	0.818	0.366	0.922		
		Structure	-0.191	0.232	0.678	0.410	0.826		
		Building Height	-0.805	0.275	8.581	0.003**	0.447		
		Above Ground	0.424	0.200	4.524	0.033*	1.529		
		Building Age	0.020	0.010	3.977	0.046	1.020		
	Density and accessibility	Building Density	0.123	0.032	14.465	<0.001***	1.131		
		Dist to Station	0.000	0.000	1.259	0.262	1.000		
	Road network structure	Road width	-0.001	0.011	0.003	0.955	0.999		
		Choice r400m	-0.003	0.002	1.665	0.197	0.997		
		Integration r400m	0.034	0.014	5.583	0.018*	1.035		
R800m	Building characteristics	Month	-	-	55.365	<0.001***	-		
		Hour	-	-	58.326	<0.001***	-		
		Building Area	-0.063	0.088	0.506	0.477	0.939		
		Structure	-0.275	0.231	1.418	0.234	0.760		
		Building Height	-0.796	0.278	8.214	0.004**	0.451		
		Above Ground	0.410	0.200	4.175	0.041*	1.506		
		Building Age	0.019	0.010	3.681	0.055	1.020		
	Density and accessibility	Building Density	0.130	0.032	16.967	<0.001***	1.139		
		Dist to Station	0.000	0.000	0.872	0.35	1.000		
	Road network structure	Road width	0.000	0.011	0.000	0.997	1.000		
		Choice r800m	0.000	0.000	2.553	0.11	1.000		
		Integration r800m	0.009	0.005	3.603	0.058	1.009		
R1,200m	Building characteristics	Month	-	-	55.568	<0.001***	-		
		Hour	-	-	55.883	<0.001***	-		
		Building Area	-0.046	0.088	0.268	0.605	0.955		
		Structure	-0.279	0.231	1.451	0.228	0.757		
		Building Height	-0.849	0.280	9.219	0.002**	0.428		
		Above Ground	0.403	0.202	3.994	0.046*	1.496		
		Building Age	0.017	0.010	2.716	0.099	1.017		
	Density and accessibility	Building Density	0.131	0.031	17.461	<0.001***	1.140		
		Dist to Station	0.000	0.000	0.948	0.330	1.000		
	Road network structure	Road width	0.002	0.011	0.047	0.828	1.002		
		Choice r1,200m	0.000	0.000	4.028	0.045*	1.000		
		Integration r1,200m	0.005	0.003	3.742	0.053	1.005		
Hosmer-Lemeshow Test									
Step	Chi-square			Df			Sig.		
	R400m	R800m	R1,200m	R400m	R800m	R1,200m	R400m	R800m	R1,200m
1	10.315	3.283	9.804	8	8	8	0.244	0.915	0.240

*p<.05, **p<.01, ***p<.001.

해 화재 사상자 발생 여부가 건축물 자체의 물리적 특성뿐 아니라 산업단지 내부 도로망의 통합성, 경로 선택성, 소방서와의 거리, 주변 건축물 밀집 조건과 어떠한 관련성을 갖는지를 실증적으로 검토하였다.

분석 결과는 다음과 같다. 첫째, 산업단지 내 화재 발생 건축물은 건축물 규모, 구조, 연식, 층수, 주변 건축물 밀도, 도로망 구조 측면에서 다양한 공간적 조건을 보였다. 특히 일부 화재 사례는 주변 건축물이 밀집된 환경에서 발생한 것으로 확인되었다. 이는 산업단지 화재 사상자 발생이 개별 건축물의 물리적 특성뿐 아니라 화재 발생 지점 주변의 건축물 배치와 공간적 밀집 조건 속에서 이해될 필요가 있음을 보여준다.

둘째, 상관관계 분석 결과, Integration 지표는 50m, 100m, 250m 버퍼 내 건축물 수와 전반적으로 양의 상관관계를 보였다. 이는 산업

단지 내부에서 통합도와 중심성이 높은 도로망 주변에 건축물이 상대적으로 밀집하는 경향이 있음을 의미한다. 즉, 산업단지의 도로망 구조는 단순한 이동 기반시설이 아니라 산업 시설의 입지와 공간적 집중을 조직하는 구조적 조건으로 작용할 수 있다. 또한 화재 사상자 발생 여부와 건축물 밀도 간 관계에서는 50m 버퍼 내 건축물 수가 가장 높은 상관관계를 보였다. 이는 사상자 발생이 광범위한 밀도 조건보다 화재 발생 지점 주변의 근접한 물리적 밀집도와 더 밀접하게 관련될 가능성을 시사한다.

셋째, 단계적 로지스틱 회귀분석 결과, 건축물 특성만을 포함한 기본 모형보다 주변 건축물 밀도와 소방서와의 거리 등 환경변수를 추가한 모형, 그리고 공간 구분론 지표를 추가한 모형에서 모형 설명력이 개선되었다. 개별 변수의 경우, 건물 높이는 모든 반경 모형에서 음의 방향으로 유의하게 나타났으며, 지상층수는 양(+)의 방향으

로 유의하게 나타났다. 이는 산업단지 화재 사상자 발생이 단순한 건축물 규모보다는 건축물의 수직적 구성과 관련될 수 있음을 보여준다. 또한 주변 건축물 밀도는 400m, 800m, 1,200m 모든 모형에서 양(+)의 방향으로 유의하게 나타났다. 이는 화재 발생 지점 인근의 건축물 밀집도가 높을수록 사상자 발생 가능성이 증가할 수 있음을 의미하며, 산업단지 화재 사상자 발생이 개별 건축물의 물리적 특성 뿐 아니라 주변 공간의 밀집 조건과도 밀접하게 관련됨을 보여준다. 반면 소방서와의 거리는 통계적으로 유의하지 않게 나타났다. 이는 소방 접근성 자체가 중요하지 않다는 의미라기보다, 본 연구의 분석 대상에서는 단순한 직선거리 기반 접근성만으로 산업단지 화재 사상자 발생 여부를 충분히 설명하기 어렵고, 화재 발생 지점 주변의 물리적 밀집 조건과 도로망 구조를 함께 고려해야 함을 시사한다.

넷째, 도로망 구조 변수의 영향은 분석 반경에 따라 차이를 보였다. Integration은 400m 반경에서 양(+)의 방향으로 유의하게 나타났다. 800m와 1,200m 반경에서는 5% 유의수준에서는 유의하지 않았으나 10% 수준에서 경향성을 보였다. 이는 화재 사상자 발생과 관련된 도로망 구조의 영향이 광역적 연결성보다 화재 발생 지점 주변의 국지적 공간구조와 더 밀접하게 관련될 수 있음을 시사한다. Choice의 경우 400m와 800m 반경에서는 유의하지 않았으나, 1,200m 반경에서는 통계적으로 유의한 관계를 보였다. 한편 도로 폭은 모든 반경에서 통계적으로 유의하지 않았다. 이는 화재 사상자 발생이 개별 도로의 물리적 폭 자체보다는 도로망 내 위치, 통합성, 경로 선택성과 같은 공간 구조적 특성과 더 관련될 수 있음을 보여준다. 특히 산업단지에서는 중심성이 높은 도로축 주변에 산업 시설, 물류 흐름, 작업자 이동, 건축물 밀도가 함께 집중될 수 있으므로, 도로망 구조는 화재 사상자 발생을 설명하는 중요한 공간적 맥락으로 이해될 필요가 있다.

본 연구의 의의는 다음과 같다. 첫째, 기존 화재위험 연구가 주로 건축물 특성, 화재 원인, 소방시설, 소방서 거리 등을 중심으로 화재 위험을 설명해 온 것과 달리, 본 연구는 산업단지 내부 도로망 구조를 화재 사상자 발생과 연결하여 분석했다는 점에서 차별성을 가진다. 둘째, 공간 구분론 지표와 주변 건축물 밀도 간의 관계를 함께 검토함으로써, 산업단지 도로망이 단순한 교통 기반시설이 아니라 산업 시설의 입지와 활동 집중을 조직하는 공간구조로 작동할 수 있음을 확인하였다. 셋째, 이항 로지스틱 회귀분석을 통해 화재 사상자 발생 여부가 건축물의 물리적 특성, 주변 건축물 밀도, 그리고 도로망의 국지적 통합성과 관련될 수 있음을 확인하였다. 이는 일반 건축물의 화재 사상자 위험이 주로 건축물 내부 조건이나 소방 접근성 측면에서 설명되어 온 것과 달리, 산업단지 화재 사상자 발생은 도로망을 기반으로 형성되는 산업활동, 주변 건축물 밀집, 내부 도로망 중심성과 함께 이해되어야 함을 보여준다.

이러한 결과는 산업단지 내 화재 취약지역을 식별하고, 화재안전 우선 관리 구역을 설정하는 데 기초 자료로 활용될 수 있다. 특히 건축·도시계획 측면에서는 통합도가 높은 중심도로 주변 중 건축물 밀집도가 높은 구역을 주요 관리 대상 공간으로 설정할 필요가 있다. 본 연구에서 50m 이내 주변 건축물 밀도가 화재 사상자 발생 여부와 높은 관련성을 보였다는 점을 고려할 때, 중심도로 주변의 근접 건축물 밀집 구역에 대해서는 현장점검과 안전관리를 강화할 필요가 있

다. 또한 산업단지 화재 안전관리는 도로 폭 자체만을 기준으로 하기보다 실제 소방차 진입 가능성, 적재물 및 불법 주차차, 화차 가능성, 소방 차량 정차 및 장비 전개 공간 등을 함께 검토하는 방식으로 이루어져야 한다. 특히 소방차 진입 동선과 피난 동선이 중첩될 수 있는 구간에 대해서는 사전 관리가 필요하며, 해당 구역의 건축물 배치, 대형 공장 및 물류시설 분포, 외부 적재공간, 피난 동선 확보 가능성을 통합적으로 검토할 필요가 있다. 즉, 산업단지 화재 안전관리는 개별 건축물의 방재 성능 개선에 머무르지 않고, 도로망 중심축 주변의 건축물 밀도와 산업활동 집중을 함께 관리하는 공간계획적 접근으로 확장될 필요가 있다.

본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 본 연구는 2023년 부산광역시 산업단지 화재 사례를 대상으로 하였기 때문에, 분석 결과를 모든 산업단지 유형에 일반화하는 데에는 한계가 있다. 산업단지는 업종, 위험물 취급 여부, 단지 규모, 도로망 형태, 건축물 배치 특성에 따라 화재위험 구조가 달라질 수 있으므로, 향후 연구에서는 화학산업단지, 물류단지, 기계·금속 중심 산업단지 등 다양한 유형의 산업단지를 비교할 필요가 있다. 둘째, 본 연구는 공간 자료로 구축 가능한 건축물 특성, 주변 건축물 밀도, 소방서 거리, 도로망 구조를 중심으로 분석하였으나, 실제 화재 대응에 영향을 미칠 수 있는 교통량, 불법 주차차, 소방차 실제 주행시간, 위험물 저장량, 건축물 내부 피난시설, 근로자 수 등의 세부 자료는 충분히 반영하지 못하였다. 셋째, 본 연구는 화재 사상자 발생 여부를 이항 변수로 분석하였기 때문에, 사상자 수나 피해 정도의 차이를 세밀하게 반영하는 데에는 한계가 있다. 향후 연구에서는 실제 출동·도착시간, 실시간 교통 자료, 산업단지 내 유동인구, 위험물 자료와 함께 사상자 수, 사망자 발생 여부, 피해 정도 등 인명피해 규모를 구분할 수 있는 자료를 결합하고, 이를 다양한 도시 및 산업단지 사례에 적용함으로써 순위형 로짓모형 또는 다항 로짓모형 등 보다 정밀한 화재 사상자 발생 위험 평가모형을 구축할 필요가 있다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비 지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20260266-001, 산업공단 초고속 화재 예측·제어·대응기술 개발).

References

- [1] 최규진 외3인, GIS를 활용한 산업단지 화재위험도 평가체계 개발, KIEAE Journal, 제24권 제4호, 2024.08, pp.105-117. // (K. Choi et al., Development of a fire risk assessment system for industrial complexes using GIS, KIEAE Journal, 24(4), 2024, pp.105-117.)
- [2] D. Brzezińska, P. Bryant, A.S. Markowski, An alternative evaluation and indicating methodology for sustainable fire safety in the process industry, Sustainability, 11(17), 2019, 4693.
- [3] 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, pp.46-52.)
- [4] 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, pp.130-139.)
- [5] 민세웅, 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, pp.107-112.)
- [6] C. Hastie, R. Searle, Socio-economic and demographic predictors of accidental dwelling fire rates, Fire Safety Journal, 84, 2016, pp.50-56.
- [7] R. Bispo et al., Spatial modelling and mapping of urban fire occurrence in Portugal, Fire safety journal, 138, 2023, 103802.
- [8] J. Xin, C. Huang, Fire risk analysis of residential buildings based on scenario clusters and its application in fire risk management, Fire Safety Journal, 62, 2013, pp.72-78.
- [9] M. Manes, D. Rush, A comprehensive investigation of the impacts of discovery time and fire brigade response time on life safety and property protection in England, Indoor and Built Environment, 32(1), 2023, pp.242-261.
- [10] D. Altafini, A. Braga, V. Cutini, Planning sustainable urban-industrial configurations: Relations among industrial complexes and the centralities of a regional continuum, International Planning Studies, 26(4), 2021, pp.349-369.
- [11] J. Lee et al., Development of a data-based machine learning model for classifying and predicting property damage caused by fire, Applied Sciences, 13(21), 2023, 11866.
- [12] 황의홍, 권오상, 산업단지 내 공장의 화재위험요인 선별을 위한 관련법령 및 문헌분석, 한국화재소방학회 논문지, 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, pp.58-70.)
- [13] K.C. Kiran, J. Corcoran, P. Chhetri, Measuring the spatial accessibility to fire stations using enhanced floating catchment method, Socio-Economic Planning Sciences, 69, 2020, 100673.
- [14] J. Zhu, X. Xu, X. Yang, Spatial accessibility measurement of urban fire stations considering multi-path characteristic of road networks, Journal of Transport Geography, 126, 2025, 104248.
- [15] Y.H. Lee, M.S. Kim, J.S. Lee, Firefighting in vulnerable areas based on the connection between fire hydrants and fire brigade, Sustainability, 13(1), 2020, 98.
- [16] A. Van Nes, C. Yamu, Introduction to space syntax in urban studies, 2021.
- [17] Y. Kim et al., Estimating casualties from urban fires: A focus on building and urban environment information, Sustainable Cities and Society, 115, 2024, 105839.
- [18] J. Zhu, X. Xu, X. Yang, A resilient location of urban fire stations considering multiple-path characteristic of uncertain road networks: Framework and case study, Reliability Engineering & System Safety, 2026, 112471.
- [19] J. Lee et al., Automatic estimation of effective road widths to assess disaster response vehicle accessibility in alleys using monocular 3D obstruction detection and road polygons, Journal of Transport Geography, 133, 2026, 104657.
- [20] L. Li et al., A method for evaluating the spatial layout of fire stations in chemical industrial parks, Applied Sciences, 14(7), 2024, 2918.
- [21] Y. Song et al., Industrial agglomeration and transport accessibility in metropolitan Seoul, Journal of Geographical Systems, 14(3), 2012, pp.299-318.
- [22] M.P. Champagne, J. Dubé, The impact of transport infrastructure on firms' location decision: A meta-analysis based on a systematic literature review, Transport Policy, 131, 2023, pp.139-155.
- [23] M. Khaki, M. Fathi, M. Mallaei, Analysis of environmental factors on the spatial structure of industrial estates in Alborz Province using the ELECTRE III method, Geographical Research, 39(3), 2024, pp.269-277.
- [24] M. Percoco, Highways, local economic structure and urban development, Journal of Economic Geography, 16(5), 2016, pp.1035-1054.
- [25] J. Hawkins, K.N. Habib, A latent auction model of firm establishment location choice in the greater Toronto area, Cities, 141, 2023, 104523.
- [26] J. Wang, V. Dixit, Calibration and validation of a national transport computable general equilibrium model for economic impact assessment, Transport Economics and Management, 2, 2024, pp.214-226.
- [27] S. Alkış, E. Aksoy, K. Akpınar, Risk assessment of industrial fires for surrounding vulnerable facilities using a multi-criteria decision support approach and GIS, Fire, 4(3), 2021, 53.
- [28] A. van Nes, C. Yamu, Analysing linear spatial relationships: The measures of connectivity, integration, and choice, In: Introduction to space syntax in urban studies, Cham: Springer International Publishing, 2021, pp.35-86.
- [29] 권형준, 안용진, 도로형태에 따른 아파트 단지 내 교통사고 예방을 위한 단지계획 방안, KIEAE Journal, 제24권 제2호, 2024.04, pp.23-34. // (H. Kwon, Y. Ahn, Strategies for apartment complex planning to prevent traffic accidents within complexes based on spatial configuration of roads, KIEAE Journal, 24(2), 2024, pp.23-34.)
- [30] R. Rishickesh, A. Shahina, A.N. Khan, Predicting forest fires using supervised and ensemble machine learning algorithms, International Journal of Recent Technology and Engineering, 8(2), 2019, pp.3697-3705.
- [31] M.Y. Choi, S. Jun, Fire risk assessment models using statistical machine learning and optimized risk indexing, Applied Sciences, 10(12), 2020, 4199.