

산업 시설 내부의 소화기 배치 모델링 및 최적화

이상우* · 신동일**†

*명지대학교 재난안전학과
17058 경기도 용인시 처인구 명지로 116

**명지대학교 화학공학과
17058 경기도 용인시 처인구 명지로 116

(2026년 1월 17일 접수, 2026년 3월 9일 수정본 접수, 2026년 4월 3일 채택)

Mathematical Modeling for Optimal Fire Extinguisher Placement in Industrial Facilities

Sangwoo Lee* and Dongil Shin**†

*Department of Disaster, Safety and Sustainability Engineering, Myongji University, Gyeonggi-do, 17058, Korea

**Department of Chemical Engineering and Department of Disaster, Safety and Sustainability Engineering,
Myongji University, Gyeonggi-do, 17058, Korea

(Received 17 January 2026; Received in revised from 9 March 2026; Accepted 3 April 2026)

요 약

산업 현장에서의 소화기 배치는 초기 화재 대응력 확보를 위한 핵심 요소이나, 기존 방식은 전문가 경험과 주관적 판단에 의존하여 설치 위치, 수량, 커버리지 측면에서 정량적 기준이 미흡하다. 이를 개선하기 위해 본 연구는 응답시간 최소화 및 설치 수량 최소화를 동시에 고려한 Mixed-Integer Linear Programming(MILP) 기반 소화기 배치 최적화 모델을 제안하였다. 제안 모델은 작업자-소화기-화재 간 이동 경로에서 장애물 회피를 반영하고, 소화기별 커버 면적, 작업자 이동 속도, 최대 대응 화재 수 등 실제 운영 조건을 제약조건으로 포함하였다. 국내 공장 레이아웃에 적용한 결과, 기존 전문가 배치 대비 약 30% 적은 소화기 수로 100% 커버리지를 확보하였으며, 최대 응답시간을 14초 이내로 단축하였다. 본 연구는 소화기 배치를 정량적·체계적으로 설계할 수 있는 방법을 제시하며, 향후 스마트팩토리 안전 설계 자동화와 AI 기반 동적 배치 연구로의 확장 가능성을 보여준다.

Abstract – Fire extinguisher placement in industrial facilities is a critical factor for effective initial fire response; however, conventional placement practices largely rely on expert experience and subjective judgment, resulting in insufficient quantitative criteria for location, quantity, and coverage. To address this limitation, this study proposes an MILP-based optimization model that simultaneously minimizes response time and the number of installed fire extinguishers. The proposed model incorporates obstacle-avoiding travel paths between workers, extinguishers, and fire locations, as well as practical operational constraints such as extinguisher coverage area, worker walking speed, and the maximum number of fires assignable to each extinguisher. The model was applied to the layout of a manufacturing facility using grid-based spatial discretization and the results demonstrate that full coverage can be achieved with approximately 30% fewer extinguishers compared to expert-based layouts, while reducing the maximum response time to within 14 seconds.

Key words: Fire extinguisher, Placement optimization, MILP, Smart factory

1. 서 론

산업 현장에서의 건축구조 변경이나 공장 레이아웃 재배치 시 관련 소방 법규를 충실히 반영하는 것은 필수적인 안전관리 항목이다.

그러나 이러한 계획 및 시공 과정에서 소형 개인용 소화기 설치의 상대적 중요도가 낮게 인식되는 경향이 있으며, 결과적으로 관리 우선순위에서 후순위로 밀리는 사례가 빈번하다. 일반적으로 소화기 배치는 건축법령 또는 소방법상 거리 기준과 위험등급을 바탕으로 설정되지만, 실제 현장에서는 안전관리자의 주관적 판단에 의존하는 경우가 많아 설치 위치와 수량의 일관성 확보가 어렵다. 이로 인해 정량적 기준에 기반한 관리 및 점검의 체계화에도 한계가 존재하며, 화재 발생 시 신속하고 효과적인 초기 대응을 저해하는 구조적 문제를 초래한다. 특히, 2024년 화성 아리셀 리튬전지 공장 화

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dongil@mju.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

제는 적합한 전용 소화기의 부족이 피해를 가중시킨 주요 원인 중 하나로 지적되면서, 현행 소화기 배치와 종류의 한계가 산업현장의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 보여주었다.

현행 소화기 배치 및 관리 방식에는 여러 문제가 공존한다. 소화기가 도면상에는 표시되어 있으나 작업자의 시야에서 벗어나 있어 화재 발생 시 신속한 인지가 어렵고, 공정 재배치나 임시 레이아웃 변경 과정에서 도면과 실제 위치 간 불일치로 인해 점검 누락과 관리 사각지대가 발생한다. 또한 증설·개조 공사 시에는 배치가 도면에 반영되지 않거나 설치 공간 부족으로 안전관리 체계가 단절되기도 한다. 관리 방식 측면에서도 대부분의 현장이 월 1회 주기 점검에 의존하고 있어, 소화기 수량이 많을수록 점검 누락과 기록 오류가 발생하며 관리 효율성이 떨어진다. 더불어 일부 구역에는 과도하게 설치되고 필수 구역에는 부족하게 설치되는 등 최적화가 이루어지지 않아 초기 대응력이 저하되고 자원 낭비가 발생한다. 최근 주목 받는 스마트팩토리 설계에서도 소화기 위치 정보가 충분히 디지털화되지 않아, 디지털 트윈 기반의 자동 점검, 위험 예측, 실시간 모니터링과 같은 고도화된 안전관리 체계와의 연계가 제한되고 있다.

따라서 소화기의 수량과 위치를 정량적으로 산정하고, 동적 환경 변화에도 대응할 수 있는 수학적 기반의 최적화 모델 도입이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 문제의식을 토대로 선행연구를 검토하고, 소화기 배치 문제를 수학적으로 정식화한 후 사례 연구를 통해 최적 배치 방안을 제시하고자 한다.

2. 이론적 고찰 및 선행연구 분석

2-1. 이론적 고찰: 소화기 배치의 원칙과 실무 기준

산업현장에서의 소화기 배치는 국제 소방법규 NFPA 10에 따라 A급 화재용 소화기의 최대 이동거리를 75ft(약 22.8 m)로 규정하고 있으며, 이는 산업현장에서 가장 널리 적용되는 기준이다[11]. 또한 Firecode Safety Equipment Inc. [10]와 O'Connor [8]의 실무 지침에 따르면, 이 거리는 단순한 직선거리가 아니라 작업자가 실제로 이동해야 하는 경로상의 거리(travel distance)로 정의되며, 벽체·기둥·장비 등 장애물의 존재에 따라 실제 유효 거리가 달라질 수 있다. 또한 평균적인 성인의 보행속도를 3.5 mph(약 1.56 m/s)로 가정할 경우, 75ft 구간의 왕복 이동거리(150 ft, 약 45.7 m)를 이동하는 데 약 30초가 소요된다[8]. 이는 화재 초기 대응에서 매우 중요한 시간으로, 짧은 시간 내에 화재 확산을 억제할 수 있는지가 결정되는 구간이다. 따라서 소화기 배치 설계 시에는 거리 기준뿐 아니라 가시성(visibility), 접근성(accessibility), 위험원과의 근접성(proximity to hazards) 등 다양한 요인을 종합적으로 고려해야 한다.

영국의 BS 5306-8 기준[12]은 이러한 배치 원칙을 보다 정량적으로 정의하며, 소화기 간격, 위치 표지판, 접근 경로 확보 등 세부 항목까지 포함한다. Koorsen Fire & Security(2024)[7]는 인구 밀집 지역, 장애인 접근성 보장, 전기설비 인근 등 특수 환경에서도 적절한 소화기 배치의 필요성을 강조하였으며, 이는 단순 거리 규정만으로는 충분한 안전성을 확보하기 어렵다는 점을 시사한다.

호주의 AS 2444-2001 지침[9]과 미국 소방청 고시(NFPC 101)[5] 역시 유사한 배치 기준을 제시하고 있으나, 대부분 권고 수준에 그치며 정량화된 수학적 판단 체계나 디지털·자동화 기반의 최적화 접근법은 미흡한 실정이다. 최근에는 수학적 최적화 기법을 활용하여 산업시설 내 소화기 위치를 결정하는 연구[13]가 제안되었으며, 이는

기존 규정 기반의 단순 배치에서 벗어나, 작업 동선·위험원 분포·공간 구조를 통합적으로 고려하는 접근 방법의 가능성을 보여준다.

2-2. 선행연구 분석: 기술 적용 및 최적화 연구 동향

소화기 배치의 설계 고도화를 위한 한 접근으로 건축 설계 연계 기반 평가 시스템이 제안된 바 있다. 대표적으로 2023년 발표된 “A System for the Developing and Evaluating Fire Extinguisher Plan of Construction Project under Visual Environment”에서는 시각 기반(BIM 연계)으로 각 지점과 소화기 간 거리를 평가하고, 적정 배치 여부를 시각적으로 표현하는 시스템이 개발되었다[2]. 그러나 해당 시스템은 설계 초기 단계에서만 활용 가능하며, 중소기업 현장에서는 BIM 도입률 저조, 전문 인력 부족, 비용 부담 등의 이유로 적용에 한계가 있다.

국내에서는 소방시설 설계가 법규 준수 중심의 수동적 대응에 머무르고 있으며, 정량적 위험 분석이나 수리모델 기반의 배치 검토가 부족하고, 성능위주설계(Performance-Based Design, PBD)의 한계를 지적하였다[4]. 이는 레이아웃이 수시로 변동되는 산업 현장, 특히 중소기업 제조업 공장에서는 부적절할 수 있음을 시사한다.

한편, 소화기 배치를 AI 기반 이미지 인식이나 거리 클러스터링 알고리즘을 통해 자동화하려는 시도도 보고되었다. 남기태(2022)[3]는 건축 구조물 이미지를 인식하여 소방설비를 자동 설계하는 AI 모델을 제안하였고, Pandit & Gupta(2011)[1]는 맨해튼 거리(Manhattan Distance)와 같은 기하학적 거리 모델을 클러스터링 분석에 적용한 바 있다. 그러나 이러한 연구들은 대상 설비의 커버리지(coverage), 응답 시간(response time), 현장 경로 반영 등의 최적화 요소를 충분히 고려하지 못한 한계가 있다.

2-3. 기존 연구의 한계 및 본 연구의 필요성

이상의 고찰을 종합하면, 기존 소화기 배치 관련 지침과 시스템은 대체로 정성적 판단 기준에 의존하고 있으며, 작업자의 실제 이동 경로, 장애물 회피, 응답 시간, 커버 면적 최적화 등을 정량적으로 통합 고려하는 모델은 매우 부족한 상황이다. 또한, BIM이나 AI 기반 모델은 주로 설계 자동화 또는 객체 인식에 초점을 맞추고 있으나, 배치 수량을 최소화하면서 동시에 응답 시간을 만족시키는 수학적 최적화 기반 현장 적용 모델은 부재하다.

따라서 본 연구는 Mixed-Integer Linear Programming (MILP)을 기반으로, 응답 시간과 설치 수량의 균형을 고려한 최적 소화기 배치 모델을 개발한다. 나아가 이를 실제 중소기업 공장 레이아웃에 적용하여 타당성을 검증함으로써, 기존 연구의 공백을 실질적으로 보완하고자 한다.

3. 최적화 모형의 수립 및 수학적 정식화

본 연구에서 제안한 소화기 배치 최적화 모델과 기존의 균등 배치 방식(75 ft 기준) 및 전문가 경험 기반 배치 방식을 목적함수, 응답시간 고려 방식, 설치 수 고려 여부, 장애물 반영, 재현성, 정량을 고려하여 Table 1에서 제안모델의 타당도를 비교하였다. 균등 배치 방식은 규정 기반의 단순 거리 기준을 통해 응답시간 최소화를 압 목적으로 달성할 수 있으나, 설치 수 증가에 대한 고려가 없고 실제 작업 동선 및 장애물을 반영하지 못하는 한계가 있다. 반면 전문가 배치는 현장 특성을 일부 반영할 수 있으나, 명시적인 목적함수가

Table 1. Comparative validity of the proposed and conventional deployment approaches

Criterion	Proposed model	Uniform deployment (75 ft Criterion)	Expert-based deployment
Objective function	$z + \lambda T_{\max}$	Implicit travel-time minimization	None
Response time considered	Yes (path-based)	Yes (distance-based)	Yes
Number of extinguishers considered	Yes	No	Yes
Obstacle consideration	Yes	No	Yes
Reproducibility	Yes	Yes	No
Quantitative comparability	Yes	No	No

부재하여 재현성과 정량적 비교가 어렵다. 이에 비해 제안 모델은 설치 수와 최대 응답시간을 동시에 목적함수로 명시적으로 고려하고, 경로 기반 응답시간 계산과 장애물 회피를 포함함으로써 안전 성능과 비용 효율성 간의 트레이드오프를 정량적으로 평가할 수 있다. 이러한 특성은 제안 모델이 기존 경험 의존적 또는 규정 중심 배치 방식의 한계를 보완하며, 산업 현장에 적용 가능한 체계적이고 재현 가능한 소화기 배치 의사결정 의사결정 도구로서의 타당성을 입증한다.

제안된 목적함수에서 소화기 설치 수(z)와 최대응답시간(T_{\max})을 동시에 고려한 것은, 설치 비용 절감과 초기 화재 대응 성능 향상이라는 상충 목적 간의 균형을 정량적으로 평가하기 위함이다. 이를 위해 본 연구에서는 해당 문제를 Mixed-Integer Linear Programming (MILP)으로 정식화 하였다.

3-1. 목적함수

제안된 최적화 모형의 목적함수(Objective Function)는 설치 소화기 수와 모든 화재 지점에 대한 최대 응답시간의 가중합(weighted sum)을 동시에 최소화하도록 정의하였다. 이는 수식 (1)과 같다.

$$\text{minimize: } \text{obj} = z + \lambda \cdot T_{\max} \tag{1}$$

여기서 $z = \sum_{q \in Q} \text{install}_q$ 설치된 소화기의 총 개수를 의미하며 T_{\max} 는 모든 화재 발생 지점 중 가장 긴 응답시간(분)을 나타낸다. 또한 가중치 계수 λ 는 특정 해를 고정하기 위한 상수가 아니라, 안전 우선 설계와 비용 효율 설계 간의 트레이드오프를 탐색하기 위한 조절 파라미터로 사용된다.

응답시간은 작업자가 소화기를 이용하여 화재에 도달하기까지의 총 소요시간으로 정의되며, 수식 (2)와 같이 계산된다.

$$\text{response}_f = \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \text{use}_{pqf} \cdot \left(\frac{\text{dist}_{pq} + \text{dist}_{qf}}{\text{speed}} \right), \forall f \in F \tag{2}$$

여기서

- use_{pqf} : 작업자가 소화기를 이용해 화재에 대응하는지 여부(1 또는 0)
- dist_{pq} : 작업자 에서 소화기 까지의 거리(장애물 회피 포함)
- dist_{qf} : 소화기 에서 화재 까지의 거리
- speed : 작업자의 이동 속도

또한, 모든 화재 지점에 대한 응답시간은 T_{\max} 이내여야 하므로 다음과 같은 제약조건(3)을 추가한다.

$$\text{response}_f \leq T_{\max}, \forall f \in F \tag{3}$$

3-2. 결정변수

본 모델에서는 다음과 같은 0-1 이진 변수와 연속형 변수를 사용

하여 소화기 설치 여부, 화재 대응 경로, 그리고 응답 시간을 수학적으로 표현하였다. 소화기 위치 q 는 공장 레이아웃을 이산화하여 정의된 설치 가능 후보 위치 집합으로부터 설정되며, 각 후보 위치에 대한 설치 여부는 최적화 과정에서 자동으로 결정된다.

- $\text{install}_q \in \{0,1\}$: 시스템에서 정의된 후보 위치 q 에 소화기를 설치할지 여부
- $\text{use}_{pqf} \in \{0,1\}$: 작업자 p 가 소화기 q 를 사용하여 화재 f 를 대응하는 경우
- $T_{\max} \in \mathbb{R}^+$: 전체 화재 대응 과정에서의 최대 응답 시간
- $\text{response}_f \in \mathbb{R}^+$: 화재 f 에 대한 실제 대응

3-3. 제약조건

3-3-1. 소화기 설치 제약

소화기 설치 제약은 설치되지 않은 소화기는 사용할 수 없다는 조건을 반영하기 위해 설정하였다. 즉, 특정 작업자 p 가 특정 소화기 q 를 이용하여 화재 f 에 대응하기 위해서는 해당 소화기가 반드시 설치되어 있어야 하며, 이는 수식 (4)과 같이 표현된다.

$$\text{use}_{pqf} \leq \text{install}_q \quad \forall p \in P, q \in Q, f \in F \tag{4}$$

여기서

- use_{pqf} : 작업자 p 가 소화기 q 를 이용해 화재 f 에 대응하는지 여부 (1 또는 0)
- install_q : 소화기 q 가 설치되었는지를 나타내는 변수(1 또는 0)

3-3-2. 화재 대응 조건(고정 매칭과 유연매칭)

화재 대응 조건은 각 화재 발생 지점에 대해 작업자-소화기 조합을 결정하는 방식으로 정의된다. 본 연구에서는 두 가지 접근 방식을 고려할 수 있다.

첫째, 고정 매칭(fixed matching) 방식은 각 화재 지점마다 근접한 단일 작업자-소화기 조합을 강제하여 유일한 경로만 선택하도록 하는 것이다. 이는 수식 (5)와 같이 표현된다.

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \text{use}_{pqf} = 1 \quad \forall f \in F \tag{5}$$

둘째, 유연 매칭(flexible matching) 방식은 하나의 화재에 대해 복수의 작업자-소화기 조합이 동시에 고려될 수 있도록 허용하는 방법이다. 이때 각 화재는 최소 1개 이상의 경로에 의해 반드시 대응되어야 하며, 이는 수식 (6)와 같이 표현된다.

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \text{use}_{pqf} \geq 1 \quad \forall f \in F \tag{6}$$

본 연구에서는 계산 효율성과 현실적 정합성 간의 균형을 고려하여 기본적으로 고정 매칭을 채택하였으나, 필요 시 유연 매칭을 보완적으로 활용할 수 있도록 하였다.

3-3-3. 응답시간 계산 및 최대값 제한

응답시간 계산 및 최대값 제한 조건은 각 화재 발생 지점에서 산출되는 응답시간 중 가장 긴 값을 최대 응답시간으로 정의하고, 이를 허용 가능한 한계치 T_{max} 이내로 제한하기 위해 설정하였다. 또한, 응답 과정에서의 탐색·인지 시간을 보정하기 위해 1/60 (1초를 분단위로 환산한 값)을 추가하였다. 이 조건은 수식 (7)와 같이 표현된다.

$$response_f = \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \left(\frac{dist_{pq} + dist_{qf}}{speed \cdot 60} \times use_{pqf} \right) + \frac{1}{60} \quad \forall f \in F \quad (7)$$

그리고 각 화재 지점에 대한 응답시간은 T_{max} 를 초과할 수 없으므로 다음의 제약식(8)이 추가된다.

$$response_f \leq T_{max}, \forall f \in F \quad (8)$$

여기서

- $dist_{pq}$: 작업자 p 에서 소화기 q 까지의 거리 (장애물 회피 포함)
- $dist_{qf}$: 소화기 q 에서 화재 f 까지의 거리
- $speed$: 작업자의 이동 속도
- use_{pqf} : 작업자 p 가 소화기 q 를 이용해 화재 f 에 대응하는지 여부 (1 또는 0)

3-3-4. 커버 면적 조건

커버 면적 조건은 설치된 소화기의 커버 면적 총합이 건물 전체 면적 이상이 되도록 보장하기 위해 설정하였다. 이때, 복수의 소화기의 커버 영역이 중복되는 경우 해당 면적은 1회만 반영되며, 교집합을 제외한 순수 커버리지를 기준으로 전체 면적과 비교한다. 이 조건은 개념적으로 수식 (9)과 같이 표현된다.

$$\sum_{q \in Q} install_q \cdot unitArea_q \geq totalArea \quad (9)$$

여기서

- $install_q$: 소화기 q 가 설치되었는지 여부(1 또는 0)
- $unitArea_q$: 소화기 q 1대가 커버할 수 있는 면적
- $totalArea$: 건물 전체 면적

실제 MILP 구현에서는 면적 합산 방식 대신 격자 셀 단위 커버 제약(cell-based coverage constraint)을 적용하였다. 공장 영역을 셀 집합 C 로 이산화하고, 소화기 q 가 셀 c 를 커버할 수 있는지를 나타내는 파라미터 $a_{qc} \in \{0,1\}$ 를 정의하였다. 이에 따라 커버리지 제약은 다음과 같다.

$$\sum_{q \in Q} a_{qc} \cdot install_q \geq 1 \quad \forall c \in C$$

여기서 $a_{qc} = 1$ 이면 소화기 q 의 커버 반경 내에 셀 C 가 포함됨을 의미하며, 모든 셀이 최소 1대 이상의 설치된 소화기에 의해 커버되도록 강제한다

3-3-5. 소화기별 최대 대응 화재 수 제약

소화기별 최대 대응 화재 수 제약은 각 소화기가 동시에 대응할 수 있는 화재의 수를 제한하기 위해 설정하였다. 본 연구에서는 한 대의 소화기가 최대 10개의 화재에만 대응할 수 있도록 하였으며, 이를 초과할 경우 비현실적인 배치가 발생할 수 있기 때문이다. 만

약 해당 제약조건이 없을 경우, 단일 소화기가 모든 영역을 커버하려는 경향이 나타날 수 있으므로, 현실적인 해를 보장하기 위해 본 조건을 추가하였다. 이 제약은 수식 (10)과 같이 표현된다.

$$\sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} use_{pqf} \leq 10, \forall q \in Q \quad (10)$$

여기서

- $q \in Q$: 설치 가능한 소화기 집합
- 상수 10 : 각 소화기별 최대 대응 가능 화재수

3-3-6. 설치수 정의

설치수 정의는 전체 모델에서 설치된 소화기의 총 개수를 나타내는 지표로 활용된다. 이는 목적함수에서 소화기 설치 수를 최소화하는 요소로 반영되며, 수식 (11)와 같이 표현된다.

$$z = \sum_{q \in Q} install_q \quad (11)$$

- z : 설치된 전체 소화기의 수

3-4. 주요 파라미터 정의

Table 2. Major parameters used in the optimization model

Symbol	Description	Value / Definition
λ	Weighting coefficient for maximum response time	0.5
speed	Average worker walking speed	1.5 m/s (5.4 km/h)
unitArea _q	Effective coverage area per extinguisher	418 m ²
totalArea	Total modeled floor area	568 cells
Q	Set of candidate extinguisher locations	Q = 14
F	Set of fire occurrence points	F = 20

Note:

1. The coverage area was derived based on the Ordinary Hazard Group 3A criterion, corresponding to 4,500 ft² converted into square meters.
2. The worker walking speed was set according to the NFPA technical services report.
3. The accessibility condition was based on a maximum travel distance of 75 ft (22.8 m), reflecting an approximate round-trip response time of 30 seconds.

4. 결과 및 토의

앞에서 제안한 소화기 배치 방법의 타당성을 검증하기 위하여 사례연구를 수행하였다. 본 사례연구는 제안된 수식 기반 최적화 모델이 실제 산업 현장 조건에서 합리적인 소화기 설치 대수, 대응 시간, 그리고 화재 커버리지를 동시에 만족하는지를 검증하는 데 목적이 있다.

최적화 결과로 도출된 소화기 설치 대수는 기존 경험적 배치 방식 대비 과도하지 않으면서도 모든 화재 지점에 대해 규정된 대응 시간 기준을 충족하였다. 또한 각 화재 지점은 최소 하나 이상의 소화기로 커버되었으며, 산출된 최대 응답시간은 초기 화재 대응에 충분한 수준으로 나타났다. 이는 제안된 모델이 정량적 지표(설치 대수, 응답시간, 커버리지)뿐만 아니라, 현장 접근성 및 배치 합리성이라는 정성적 요구사항 또한 만족함을 의미한다.

단순화된 문제를 통해 제안 방법이 목적함수와 제약조건의 의도에

따라 정상적으로 작동함을 먼저 확인하였으며, 이를 통해 수식 모델링의 논리적 타당성을 검증하였다. 이러한 검증을 바탕으로, 후속 사례에서는 실제 공장 레이아웃을 적용한 보다 복잡한 환경에서도 본 방법이 효과적으로 적용 가능함을 추가적으로 확인하고자 한다.

4-1. 단순 레이아웃 기반 검증 예제

본 연구에서 제안하는 소화기 배치 최적화 모델은 작업자의 실제 이동 경로, 장애물 회피, 응답시간 제약, 설치 수 최소화 등을 동시에 고려하는 구조를 갖는다. 이러한 특성으로 인해 수학적 정식화만으로는 모델의 작동 원리를 직관적으로 이해하는 데 한계가 있을 수 있다. 이에 본 절에서는 제안 모델의 기본 개념과 작동 메커니즘을 쉽게 설명하기 위해 단순화된 가상 공장 레이아웃을 구성하고, 장애물 회피 기반 이동거리 산정과 최적 소화기 배치 결과를 먼저 제시한다. 이후 절에서는 동일한 개념을 실제 중소기업 공장 레이아웃에 확장하여 Mixed-Integer Linear Programming(MILP) 형태로 수학적 정식화를 수행한다.

4-1-1. 단순 레이아웃 및 입력 조건 설정

단순 검증 예제에서는 가로 100 m, 세로 100 m의 정사각형 평면 공간을 가정하였다. 해당 공간은 1 m × 1 m 크기의 격자(grid)로 분할되었으며, 각 격자는 작업자의 이동 가능 여부를 판단하는 최소 단위로 사용되었다. 화재 발생 지점은 공간 내에 등간격으로 배치된 9개 지점(3 × 3 배열)으로 설정하였고, 이는 특정 위치에 편중되지 않은 일반적인 화재 발생 상황을 모사하기 위함이다.

소화기 설치 위치는 설명의 단순성을 위해 사전에 정의된 후보 위치 집합으로 제한하였다. 본 예제에서는 20 m 간격으로 배치된 16개의 후보 소화기 위치를 사용하였으며, 실제 설치 여부는 최적화 결과에 의해 결정된다. 작업자 위치는 중앙 인근의 단일 지점으로 설정하여, 다수 작업자에 따른 복잡성은 배제하였다.

또한 실제 공장 환경을 단순화하여 모사하기 위해, 중앙부에 가로 방향으로 배치된 직사각형 형태의 설비 영역을 장애물로 정의하였다. 해당 영역은 작업자가 통과할 수 없는 이동 불가 셀(blocked cells)로 설정되었으며, 작업자는 반드시 이를 우회하여 이동하도록 제한된다. Fig. 1은 주요인자별 Layout에 배치된 이미지를 나타낸다.

4-1-2. 장애물 회피 기반 이동거리 산정

본 연구에서는 소화기와 화재 지점 간 이동 거리를 단순한 좌표 간 직선 거리나 맨해튼 거리 계산으로 산정하지 않고, 장애물 회피 조건을 포함한 실제 이동 가능 경로 기반 거리로 정의하였다. 이를 위해 격자 공간에서 상·하·좌·우 방향 이동만 허용하는 맨해튼 이동 규칙을 적용하고, 이동 불가 셀을 제외한 경로 중 최단 경로를 탐색하였다.

이와 같은 조건하에서 소화기 q 에서 화재 지점 f 까지의 이동 거리 d_{qf} 는 다음과 같이 정의된다.

$$d_{qf} = \text{Shortest Path}_{\text{Manhattan}}(q \rightarrow f | \text{blocked cell})$$

여기서 d_{qf} 는 장애물을 무시한 기하학적 거리 계산 결과가 아니라, 벽체 및 설비를 회피하면서 실제로 이동 가능한 경로 중 최단 경로의 길이를 의미한다. 본 예제에서는 모든 격자 이동의 비용이 동일하다고 가정하였으므로, 해당 최단 경로는 너비 우선 탐색(Breadth-First Search, BFS) 알고리즘을 이용하여 산출하였다. 이를 통해 화

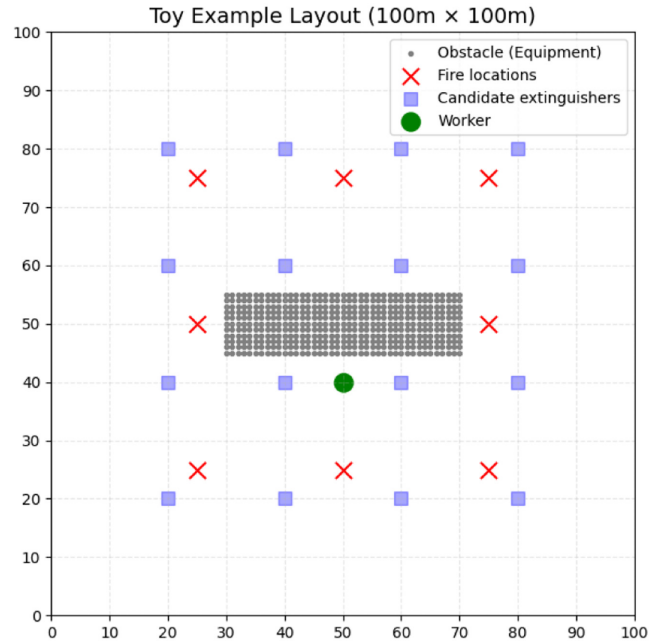


Fig. 1. Initial layout of the toy problem prior to optimization.

재 위치에 따라 이동 경로가 장애물에 의해 우회되는 현상이 거리 값에 자연스럽게 반영된다.

4-1-3. 최적 소화기 배치 결과

상기 조건을 기반으로 제안된 MILP 최적화 모델을 적용한 결과 Table 3의 결과로 총 4개의 소화기가 선택되었으며 모든 화재 지점에 대해 30초 이내 대응이 가능한 배치가 도출되었다. Fig. 2은 파이선을 이용하여 Toy example을 최적화한 결과를 이미지로 표시하였다. 각 화재 지점은 하나의 소화기에 할당되었으며, 계산된 T_{max} 는 약 13.3초로 나타났다.

이는 규정상 요구되는 초기 대응 시간 기준을 충분히 만족하는 수준이며, 동시에 최소한의 소화기 수로 대응 성능을 확보한 결과이다. 각 화재 지점별 응답시간은 약 10초에서 13.3초 범위로 분포하였으며, 특정 화재 지점에 대한 과도한 응답시간 증가 현상은 관찰되지 않았다.

4-1-4. 장애물 유무에 따른 결과 비교 및 해석

추가적으로, 동일한 조건에서 장애물을 제거한 경우와 장애물을 포함한 경우를 비교 분석하였다. Table 4의 결과값 도표를 비교한 결과 두 경우 모두 선택된 소화기 위치, 설치 개수(4개), T_{max} (약 13.33초) 동일하게 나타났다.

이 결과는 본 예제 설정 하에서는 선택된 소화기 위치가 장애물의 직접적인 영향권을 회피하는 위치에 균형 있게 분포되어 있었기 때

Table 3. Optimization results of the toy example

Metric	Result
Solver status	Optimal
Number of selected extinguishers	4
Selected extinguisher locations (x, y)	(20,40), (40,80), (60,20), (80,60)
Maximum response time, T_{max}	13.3 s

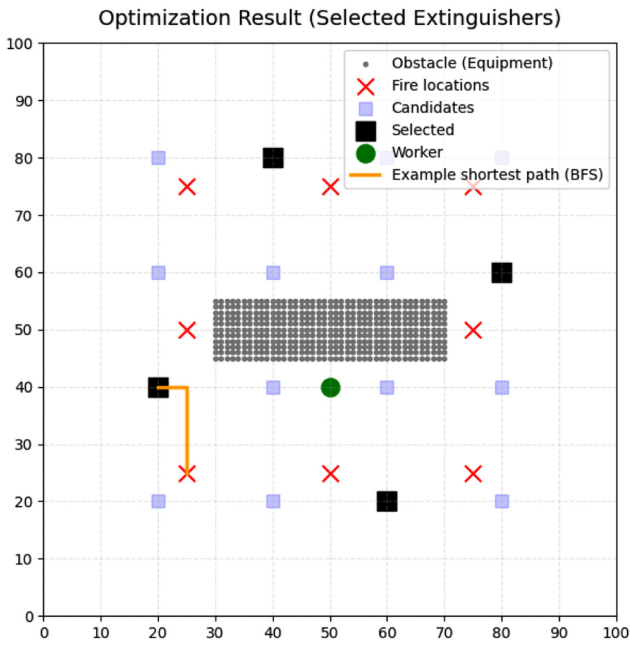


Fig. 2. Optimized extinguisher layout for the toy problem.

문으로 해석할 수 있다. 즉, 장애물 유무에 관계없이 모든 화재 지점에 대해 충분한 여유를 가진 대응 경로가 확보된 배치가 도출된 것이다. 이는 제한 모델이 특정 장애물 배치에 민감하게 반응하는 것이 아니라, 비교적 안정적(robust)인 소화기 배치를 도출할 수 있음을 시사한다.

다만, 이러한 결과는 본 절의 단순 예제 설정에 따른 것이며, 장

애물의 위치나 형태, 후보 소화기 위치의 밀도에 따라 최적 배치 결과는 달라질 수 있다. 이에 대한 보다 현실적인 검증은 다음 절에서 실제 중소기업 공장 레이아웃을 대상으로 수행한다.

4-2. 중소기업 사례 적용을 통한 모델 타당성 평가

소화기 배치 최적화 모델의 실효성을 추가 검증하기 위하여, 경기도 성남시 소재 중소기업 ㈜삼OOOOO의 실제 공장을 대상으로 적용하였다. 해당 공장은 온습도측정기 생산라인으로, 비교적 단순한 Layout 구조와 Batch생산방식으로 배치된 형태로 구성되어 있다.

4-2-1. 공장 Layout 구조와 데이터 전처리

• 공장 Layout은 AutoCAD 도면을 기반으로 Fig. 3에서 보는 바와 같이 Grid 형태로 구분하여 작업자 작업자, 설비, 통로 등의 위치를 Table 5와 같이 좌표화하였다. Grid의 간격은 가로,세로 각 0.5 m로 바닥 타일 크기와 동기화함

• 각 요소의 위치는 아래와 같은 범례로 시각화하였다:

- * : 예상 화재 발생 위치
- ● : 작업자 위치
- ■ : 소화기 설치 후보 위치

본 사례 연구에서 화재 발생 위치(F=20)는 공장 레이아웃 분석을 통해 전기 콘센트, 분전함, 장비 전원부 등 잠재적 발화 위험 요소가 존재하는 지점을 중심으로 선정하였다. 작업자 위치(P=15)는 작업대 및 상시 인원 배치 구역을 기준으로 설정하여 실제 초기 대응 가능성을 반영하였다. 이러한 위치 선정은 대상 공장의 실제 배치 구조와 운영 특성을 기반으로 설정되었다.

• 각요소의 좌표값은 X축과 Y축값으로 표시 (ex.화재1(x 2.5, y 18))

본 사례 연구에서 수행한 최적화 시뮬레이션은 공장 내 main 생

Table 4. Comparison of optimization results with and without obstacles (Toy example)

Scenario	Solver status	Number of selected extinguishers	Maximum response time t_{max} (sec)	Selected extinguisher locations (x, y)
Without obstacle	Optimal	4	13.33	(20,40), (40,80), (60,20), (80,60)
With obstacle	Optimal	4	13.33	(20,40), (40,80), (60,20), (80,60)

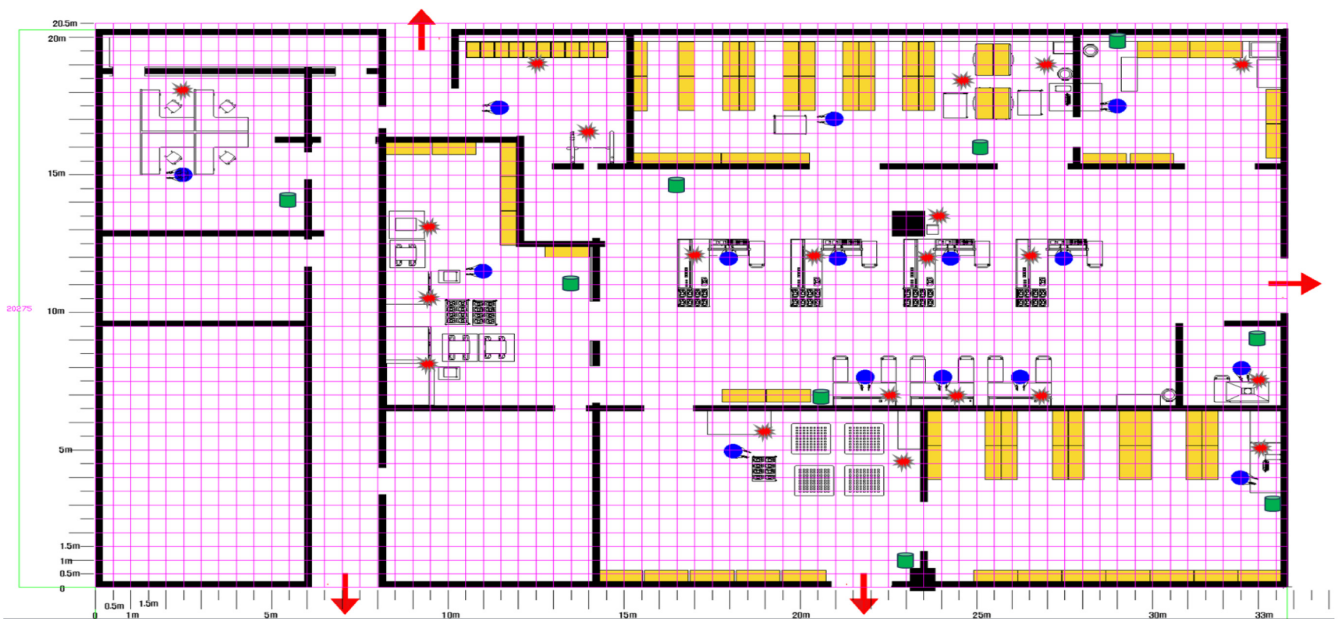


Fig. 3. Grid-based Layout.

Table 5. Coordinates of each modeling element

Fire occurrence points		Candidate extinguisher locations		Worker locations	
ID	Coordinates (x, y)	ID	Coordinates (x, y)	ID	Coordinates (x, y)
F1	2.5, 18	Q1	5.5, 14	P1	2.5, 15
F2	9.5, 8	Q2	13.5, 11	P2	11, 11.5
F3	9.5, 10.5	Q3	16.5, 14.5	P3	11.5, 17.5
F4	9.5, 13	Q4	20.5, 7	P4	18, 5
F5	12.5, 19	Q5	23, 1	P5	18, 12
F6	14, 11.5	Q6	25, 16	P6	21, 12
F7	17, 12	Q7	29, 20	P7	21, 17
F8	19, 5.5	Q8	33, 9	P8	22, 7.5
F9	20.5, 12	Q9	33.5, 3	P9	24, 7.5
F10	22.5, 7	Q10	5.5, 8	P10	24.5, 12
F11	23, 4.5	Q11	7.5, 5.5	P11	26, 7.5
F12	23.5, 12	Q12	11, 18.5	P12	27.5, 12
F13	24, 13.5	Q13	33, 14.5	P13	29, 17.5
F14	24.5, 18.5	Q14	29.5, 3.5	P14	32.5, 4
F15	26.5, 12			P15	32.5, 8
F16	27, 6				
F17	27, 19.5				
F18	32.5, 19.5				
F19	33, 5				
F20	33, 6.5				

산라인 영역을 대상으로 수행되었으며, 컴프레시실과 같은 별도 구획 공간은 본 연구의 분석 범위(scope)에서 제외하였다. 이는 작업자의 주요 동선이 형성되는 핵심 생산 구역을 중심으로 모델의 적용 가능성을 검증하기 위한 설정이다. 다만, 해당 구획 공간 역시 동일한 좌표 매핑 및 장애물 설정 절차를 적용함으로써 모델 확장이 가능하다.

4-2-2. 최적화 Solver를 이용한 풀이

본 연구의 소화기 배치 모델은 이진 변수(install, use)와 연속 변수인 T_{max} 를 포함하며, 목적함수와 제약식이 모두 선형식으로 구성되어 Mixed-Integer Linear Programming (MILP) 문제로 분류된다.

MILP는 정수(이진) 변수와 연속 변수가 혼합되고, 모든 제약이 선형 방정식·부등식 형태로 표현되는 최적화 문제이다. 연구에서는 Python의 PuLP 라이브러리를 사용하여 모델을 구현하였으며, 기본 MILP Solver로는 오픈소스인 CBC (Coin-OR Branch-and-Cut)를 적용하였다. CBC는 선형 완화(Linear Relaxation), 분기 한정법(Branch-and-Bound Method), 단평면(Single-Plane Model), 사전 처리 및 휴리스틱(Pre-processing & Heuristics)을 통해 MILP를 해결한다.

4-2-3. 소화기 배치 최적화 결과

본 절에서는 장애물 및 커버리지 제약을 추가하여, 소화기 설치 시

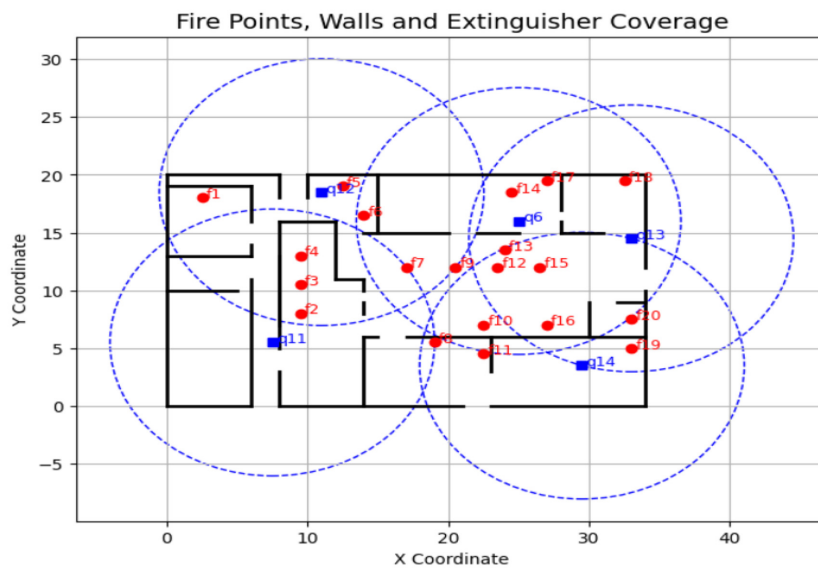


Fig. 4. Optimized fire extinguisher placement and coverage area representation.

Table 6. Summary table of optimization results

Metric	Value
Number of installed extinguishers	5 (Q6, Q11, Q12, Q13, Q14)
Coverage	568 / 568 cells (100%)
Maximum response time, T_{max}	14.0 s
Weighting parameter, λ	0.5

전체 영역이 반드시 커버되도록 하였다. 각 소화기의 커버 반경은 원형 영역으로 정의되었으며, 모든 내부 셀이 최소 한 대의 소화기에 의해 커버되도록 제약조건에 포함하였다. Fig. 4는 소화기 배치가 응답 시간뿐만 아니라 공간적 커버리지를 동시에 만족하는 결과를 보여주고 있으며 Table 6는 최종 계산 결과를 보여준다.

4-3. 화재 대응방식 비교

화재 대응 조건에는 두 가지 접근 방식이 존재한다. 본 연구에서는 현실 상황과의 정합성을 고려하여 고정 매칭(**fixed matching**) 방식을 채택하였다. 고정 매칭은 각 화재 발생 지점(**fire**)과 가장 가까운 작업자(**worker**)를 사전에 지정한 뒤, 해당 작업자만을 고려하여 소화기 위치를 결정하는 방식이다. 즉, 각 화재에 대해 하나의 작업자가 고정적으로 연결되며, **fire-to-worker** 매핑을 사전에 정의함으로써 가능한 경로 수를 제한하고 모델의 계산 복잡도를 낮추는 특징이 있다. 반면, 유연 매칭(**flexible matching**) 방식은 모든 가능한 작업자-소화기-화재(**p-q-f**) 조합을 고려하는 완전탐색(**complete enumeration**) 기반 접근법이다. Python의 `itertools.product` 함수를 활용하여 가능한 모든 조합을 생성하고 평가할 수 있으며, 다양한 시나리오를 반영할 수 있다는 장점이 있다. 유연 매칭은 현실 적용 가능성과 해의 최적성 측면에서 더 폭넓은 분석을 가능하게 한다.

4-3-1. 고정 매칭 결과

고정 매칭 조건에서 소화기 설치 수는 총 3대로 산출되었으며, T_{max} 는 18.67초, 목적함수 값은 3.16으로 계산되었다. 이는 계산 효율성 측면에서 단순화 효과가 있었으나, 일부 화재 지점에서는 응답 시간이 길어지거나 커버 반경의 중복 문제가 발생하였다.

4-3-2. 유연 매칭 결과

유연 매칭 조건에서도 소화기 설치 수는 총 3대로 동일하였으나, T_{max} 는 16.67초로 고정 매칭 대비 개선되었다. 또한 목적함수 값은 3.14로 소폭 감소하여 효율성과 응답 성능 측면에서 더 나은 결과를 보였다. Table 7은 대응 조건별 소화기 설치 수와 응답시간을 비교하였다.

추가적으로, 화재별 응답시간의 차이를 정리한 결과는 Table 8에 제시하였다. 이는 특정 화재 지점에 따라 고정 매칭과 유연 매칭 간 응답시간 차이가 크다는 점을 보여주며, 실제 적용 시 배치 전략 선택에 참고가 될 수 있다.

Table 7. Comparison of optimization results under fixed and flexible matching

Metric	Fixed matching	Flexible matching
Number of installed extinguishers	3	3
Maximum response time, T_{max} (s)	18.67	16.67
Objective function value	3.16	3.14

Table 8. Comparison of fire response times under fixed and flexible matching

Fire point	Fixed matching (s)	Flexible matching (s)	Difference (Flexible – Fixed) (s)
F1	4.67	16.67	12
F2	18	8.67	-9.33
F3	18	12.67	-5.33
F4	18.67	12	-6.67
F5	8.67	16.67	8
F6	10	12.67	2.67
F7	18	12.67	-5.33
F8	18	12.67	-5.33
F9	8.67	12	3.33
F10	18.67	8.67	-10.00
F11	4.67	13.33	8.66
F12	5.33	16	10.67
F13	4.67	8.67	4
F14	4	11.33	7.33
F15	5.33	15.33	10
F16	12	9.33	-2.67
F17	4.67	16.67	12
F18	14	13.33	-0.67
F19	12.67	15.33	2.66
F20	11.33	13.33	2

4-4. λ 값 변화와 전문가 배치 비교 분석

4-4-1. λ 값 변화에 따른 최적화 결과 분석

본 연구에서는 혼합정수선형계획(MILP) 기반의 최적화 모델에서 목적함수의 가중치 파라미터 λ 가 해(solution)에 미치는 영향을 분석하였다. λ 는 소화기 설치 수 최소화(비용)과 T_{max} (안전성) 사이의 균형을 조정하는 핵심 변수로 작동한다.

Fig. 5는 동일한 커버리지 제약 조건에서 λ 값 변화에 따른 결과를 나타낸 것이다. $\lambda=0.0$ 에서는 설치 대수 5대로 최소화되었으나 T_{max} 가 44.6초로 30초 기준을 초과하였다. $\lambda=0.5$ 에서는 설치 수는 동일하게 5대였으나 T_{max} 가 14.0초로 크게 단축되었고, $\lambda=1.0$ 에서는 T_{max} 가 12.0초로 추가 감소하는 대신 설치 대수가 6대로 증가하였다. 이는 정수 변수 특성에 따라 해가 계단형으로 변화하기 때문이다.

Fig. 6은 $\lambda=0.0$ 과 $\lambda=1.0$ 조건에서의 배치 결과를 비교한 것으로, λ 증가에 따라 T_{max} 는 감소하나 설치 대수가 증가하는 경향을 시각적으로 보여준다.

종합하면, λ 값 증가는 T_{max} 에는 효과적이지만 설치 대수 증가를 수반하며 비용과 안전성 사이의 trade-off가 발생한다.

본 연구에서는 $\lambda=0.5$ 를 비용(설치 수)과 안전성(T_{max})을 동일한 중요도로 고려하는 균형 시나리오로 설정하였다. $\lambda=0.0, 0.5, 1.0$ 에 대한 비교 분석 결과, $\lambda=0.5$ 는 설치 수 증가 없이 T_{max} 를 유의미하게 단축하는 해를 도출하여, 실무 설계 단계에서 경제성과 안전성을 동시에 확보할 수 있는 현실적인 절충안으로 해석된다.

한편, 본 연구에서 제시한 30초 응답시간 기준은 모델 내부에 하드 제약으로 직접 포함된 조건은 아니다. 본 최적화 모형은 목적함수 $z + \lambda T_{max}$ 구조를 통해 최대 응답시간을 최소화하도록 설계되었으며, λ 값 조정을 통해 응답시간을 간접적으로 통제하였다. NFPA 10 기준(75 ft 왕복 약 30초) 충족 여부는 사후 적합성 검증 단계에서 확인하였다.

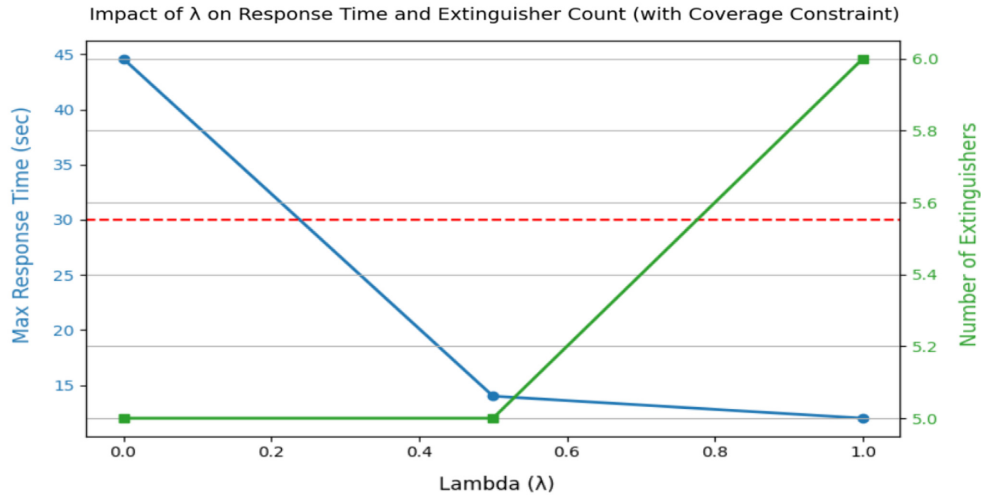


Fig. 5. Variation of maximum response time and fire extinguisher installations according to λ values.

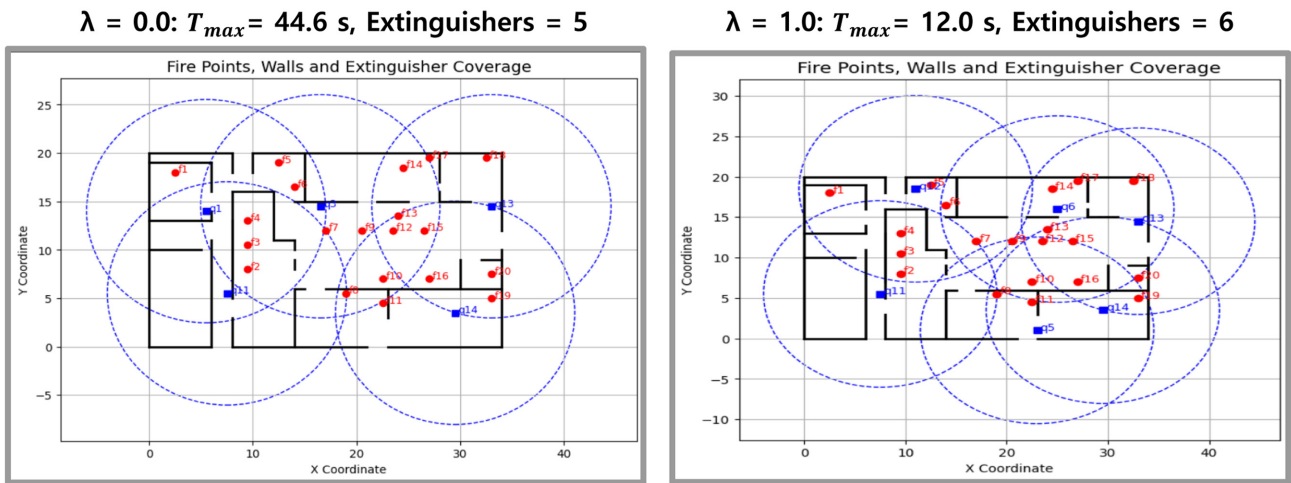


Fig. 6. Comparison of coverage and fire extinguisher placement simulations with varying λ values.

λ = 0.0 : 최대응답시간 44.6초, 소화기 : 5대 λ = 1.0 : 최대응답시간 12초, 소화기 대수 : 6대

4-4-2. 전문가·실무자 배치와 최적화 모델 비교

최적화 모델의 효과성을 검증하기 위해, 동일한 공장 평면도를 대상으로 전문가(ESG 담당자)가 주관적으로 배치한 결과와 모델 산출값을 비교하였다. 비전문가(1인)와 ESG담당자(2인)는 소화기 수량 제한 없이 최적이라고 판단되는 위치를 표시하였다.

그 결과, Fig. 7에서 보는 바와 같이 비전문가 배치와 ESG 담당자 배치의 소화기 수는 각각 17~20개로 나타나, 법적 최소 기준을 크게 상회하였다. 모든 배치는 설비 밀집 구역, 출입구 인근, 공용 복도에 집중되는 경향을 보였으나, 구조적 사각지대 및 장거리 동선에 대한 고려는 부족하였다. 이는 많은 수의 소화기를 배치했음에도 불구하고 공간 전반의 대응력이 충분히 확보되지 않았음을 의미한다.

반면, 최적화 모델은 λ 값 설정에 따라 소화기 수를 5~6대로 제한하면서도 최대 응답시간을 12~14초 이내로 통제할 수 있었다. 이는 주관적 판단에 기반한 배치보다 효율적이며, 적은 수량으로도 안전성과 비용의 균형을 동시에 달성할 수 있는 잠재력을 보여준다.

4-5. 최적화 해와 전문가 배치 해의 비교

4-5-1. 정량적 성능 비교

본 절의 정량 비교는 4.2절에서 정의한 main 생산라인 영역을 동일 기준으로 적용하여 수행하였다. Fig. 7에서는 전체 도면이 표시되어 있으나, Table 9의 설치 수, T_{max} , 커버리지 지표는 분석 범위로 정의된 영역을 기준으로 산정하였다. 이를 통해 전문가 배치와 최적화 모델 간 비교 조건의 일관성과 공정성을 확보하였다.

Table 9는 제안한 최적화 기반 소화기 배치안과 기존 전문가 배치안, 그리고 균일간격 배치안 간의 정량적 성능을 비교한 결과를 나타낸다. 제안방법은 소화기 설치 대수를 5대로 제한하면서도 모든 화재 지점을 100% 커버하고 T_{max} 를 14초 이내로 유지하는 것으로 나타났다. 이는 전문가 배치안(평균 17대)과 비교할 때 설치 대수 측면에서 유의미한 차이를 보이는 결과로, 초기 설비 투자 비용 및 배치 검토에 소요되는 시간 측면에서 실질적인 효율 향상을 의미한다.

커버리지 측면에서도 Table 7에서 확인할 수 있듯이, 제안한 최적화 해는 모든 화재 지점을 규정된 대응 시간 이내에 커버하면서 중복 커버 영역을 최소화하였다. 반면, 전문가 배치안은 충분한 커버리지를 확보하기 위해 다수의 소화기를 설치하는 방식으로, 중복

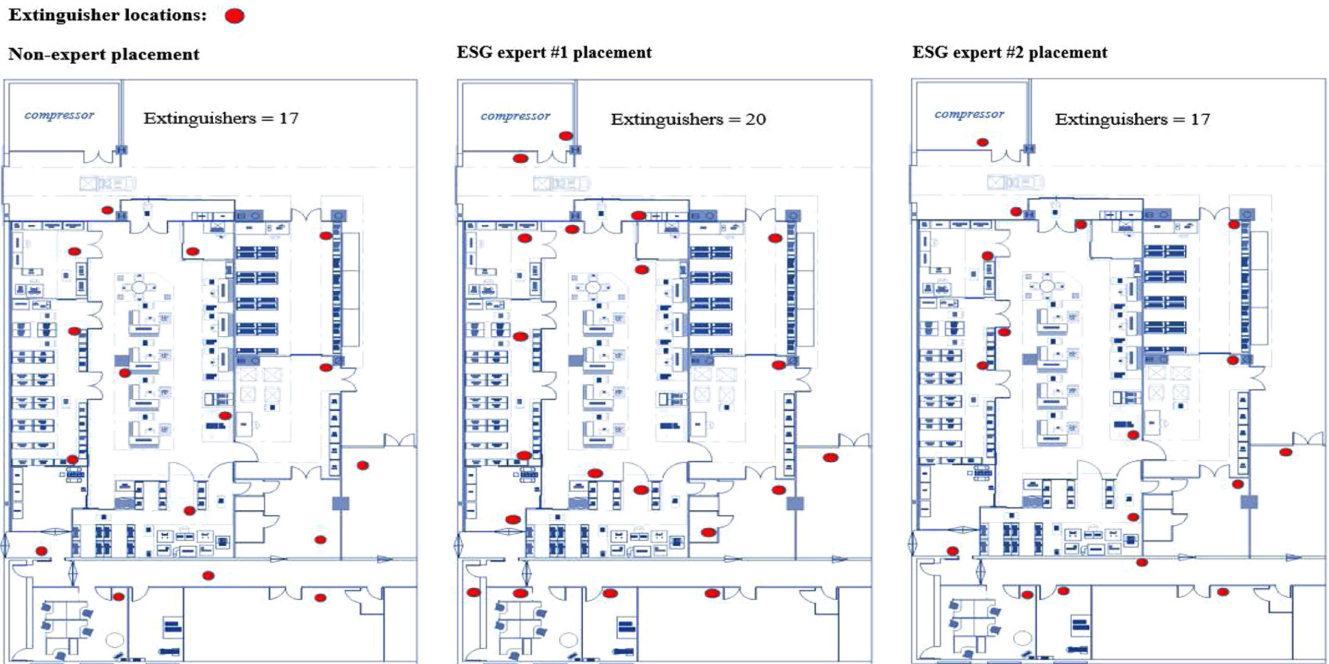


Fig. 7. Marked layout of fire extinguisher placement by individual.

Table 9. Quantitative performance comparison of fire extinguisher placement methods

Method	No. of extinguishers	Response time (s)	Coverage	Remarks
Proposed optimization method	5	14.0	100%	
Expert-based placement	17	6.8	100%	
Uniform placement (75 ft criterion)	2	19.5	54%	Obstacles not considered

설치에 따른 비효율성이 발생하는 것으로 분석되었다. 이러한 비교 결과는 제안방법이 동일한 커버리지 수준을 보다 적은 설비로 달성할 수 있음을 정량적으로 보여준다.

또한 Table 9에 제시된 제안방법의 결과는 MILP 기반 최적화 Solver를 통해 도출된 전역 최적해이다. Solver 해석 결과, 모든 제약조건을 만족하면서 소화기 설치 대수를 5대 미만으로 줄이는 해는 존재하지 않는 것으로 확인되었으며, 이는 본 연구에서 도출된 해가 단순히 기존 배치안 대비 우수한 국소 최적해가 아님을 의미한다.

한편, 균일간격 배치안의 경우 설치 대수는 2대로 가장 적으나, Table 9에서 보듯이 T_{max} 가 19.5초로 증가하고 전체 커버리지가 54%에 그쳐 일부 화재 지점에서 대응 시간 및 커버리지 제약을 충족하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 균일간격 배치가 실현 가능한 해(feasible solution)가 아님을 의미하며, 단순한 공간 분할이나 경험적 규칙에 기반한 배치 방식이 복잡한 산업 현장의 화재 대응 요구를 충분히 반영하지 못함을 시사한다. 이러한 결과는 본 연구에서 제안한 최적화 기반 배치 접근의 필요성과 우수성을 Table 9의 정량적 비교를 통해 명확히 입증한다.

Table 9의 전문가 배치 결과(6.8초)는 전문가가 제안한 17대 설치 조건을 고정된 상태에서 동일한 작업자-소화기-화재 이동 경로 계산 방식을 적용하여 산출한 값이다. 이는 설치 수 증가에 따른 대응 시간 감소 효과를 보여주는 비교 시나리오로 제시된 결과이며, 본 연구에서 14초로 제시한 T_{max} 는 설치 수 최소화를 동시에 고려한 최적화 결과에 해당한다.

4-5-2. 정성적 평가

정성적 측면에서는 전문가의 직관적 배치와 최적화 알고리즘의 수학적 배치를 비교하였다. 전문가의 배치는 ‘가시성(visibility)’과 ‘장애물 회피’ 등 현장 경험에 기반한 판단 요소를 반영하는 반면, 제안된 시스템은 ‘경로 기반 거리 최소화’와 ‘중복 커버 최소화’와 같은 수학적 기준에 따라 소화기 위치를 도출한다.

응급 상황에서의 실제 적용 가능성을 고려할 때, 작업자의 이동 경로 예측 정확도뿐 아니라 현장의 설비 배치, 통로 구조, 시야 확보 가능 영역 등이 종합적으로 반영되어야 한다. 이러한 요소들은 현재 모델에서 일부 제약조건으로 반영되어 있으나, 완전한 가시성 분석까지 포함하지는 않는다.

특히 소화기의 가시성(visibility)은 초기 인지 및 대응 행동에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로, 단순 경로 기반 최적화만으로는 실제 대응 성능을 완전히 설명하기 어렵다. 따라서 향후에는 알고리즘 기반 최적화 결과와 전문가의 경험적 판단 요소를 결합한 하이브리드 배치 전략이 보다 현실적이고 신뢰성 높은 설계 대안이 될 수 있다.

4-5-3. 모델 한계 및 차이 원인 분석

양자의 차이는 기본 가정의 차이에서 비롯된 것으로 볼 수 있다. 제안된 시스템은 맨해튼 거리와 고정된 작업자 이동 속도(1.5 m/s)를 기반으로 하며, 소화기 및 화재 발생 후보지를 사전에 설정하는 방식으로 모델링 되었다. 반면, 전문가 배치는 실제 보행 환경에서의 속도 변화와 시야 확보 여부 등을 종합적으로 고려하여 이루어진다. 또한 입력 데이터의 민감도 측면에서, 장애물의 위치와 벽체 분포 등

공간 요소가 배치 결과에 큰 영향을 미치며, 전문가 배치의 경우 주관적인 판단에 따른 신뢰성 문제가 존재할 수 있다.

4-5-4. 결과의 해석 및 시사점

사례연구 결과는 안전성과 경제성 간의 균형에 대한 시사점을 제공한다. 제안된 최적화 해는 응답 속도와 설치 비용을 동시에 개선하여 효율성을 확보한 반면, 전문가 배치는 응급 상황 시 체감 안전도를 향상시킬 수 있는 가능성을 갖는다. 이러한 차이를 종합적으로 고려할 때, 알고리즘에는 시야 확보 가능 영역(visual field)에 대한 제약조건을 추가하고, 전문가 의견을 반영한 하이브리드 배치 전략을 채택함으로써 실용성과 신뢰도를 동시에 높일 수 있을 것으로 기대된다.

4-6. 토의

4-6-1. 화재 위치 선정의 타당성

제안 최적화 기법은 물론이고 전문가에 의한 배치 경우도 해당 현장에서 발생할 수 있는 주요 화재의 위치와 크기에 의해 배치가 결정된다. 또한 배치 결과의 평가에 있어서도 배치에 사용된 화재만이 발생할 수 있다고 가정하여 평가한 허점이 있다. 위험성 평가가 가능한 경우(각 화재의 빈도와 위험도가 정해짐), 이를 기초로 n개의 화재에서 m개만을 무작위(Random)로 추출해 배치를 진행하고, 선택되지 않은 n-m개를 이용해 배치 성능을 평가하는 stochastic optimization이 개선 방법론으로 제안된다. 이는 기계학습 예측모델에서도 동일하게 사용되는 80:20 데이터 분할 방식과 유사하다.

4-6-2. 공간 기준과 시간 기준의 커버리지 차이

본 연구에서 수행한 실험 결과, 소화기 배치의 기준을 시간 기반으로 설정할 경우와 공간 커버리지를 기준으로 설정할 경우 설치 소화기 수에서 현격한 차이가 발생하였다. 구체적으로, T_{max} 를 30초 이내 도달을 기준으로 한 경우 소화기 3대만으로도 모든 화재 발생 위치에 대해 요구 조건을 충족시킬 수 있었으나, 전체 영역 커버리지를 만족시키기 위한 공간 기준 적용 시에는 5대의 소화기가 필요하였다.

이는 시간 기준의 최적화 해는 실제 화재 대응 가능성에는 부합하나, 법적 또는 규정상 요구되는 커버 면적 기준과는 일치하지 않을 수 있음을 시사한다. 따라서 배치 최적화 시에는 T_{max} 기반 평가 외에도, 규정된 커버 면적 요건을 동시에 만족시키기 위한 다목적 최적화 혹은 제약조건 간의 균형 설정이 필요하다. 이러한 결과는 T_{max} 의 실효성과 공간 기준의 제도적 정합성 간 충돌 가능성을 보여주며, 향후 스마트팩토리 환경에서의 지능형 안전 배치 설계 시 두 기준을 병행 고려해야 함을 의미한다.

5. 결 론

본 연구는 산업 현장의 소화기 배치에서 나타나는 비효율성과 표준화 부족 문제를 해결하기 위해, 응답시간 최소화과 설치 수 최소화를 동시에 고려한 MILP 기반 최적화 모델을 제안하였다. 모델은 작업자 이동 속도, 장애물 회피, 커버 면적, 소화기별 최대 대응 화재 수 등 현실적인 제약조건을 반영하였으며, 이를 실제 중소기업 공장 평면도에 적용하였다. 그 결과, 전문가 배치안(17~20대) 대비 약 70% 이상의 설치 수 감소 효과를 보이며 5대의 소화기로 전체

영역 커버리지를 확보하고, 최대 응답시간 T_{max} 를 14초 이내로 단축하는 성과를 도출하였다. 이는 설치 비용 절감과 대응력 향상을 동시에 달성한 사례로서, 경험 의존형 배치 방식의 한계를 극복한 것으로 평가된다.

시뮬레이션 결과, λ 가중치 조정을 통해 설치 수와 응답시간 간의 trade-off를 정량적으로 분석할 수 있었으며, 설계 단계에서 안전성과 비용 간 균형을 정책적으로 조정할 수 있음을 확인하였다. 또한 AutoCAD 평면도 좌표화와 Python 기반 MILP 모델을 결합한 표준 절차를 제시함으로써, 데이터 수집-모델링-해석-배치 적용까지 일관된 프로세스를 제공하였다. 나아가 화재 대응 조건에 대해 고정 매칭(fixed matching)과 유연 매칭(flexible matching)을 비교한 결과, 설치 수는 동일하게 3대였으나 유연 매칭이 최대 응답시간 T_{max} 를 약 2초 단축(18.67초 → 16.67초)하여 보다 효율적인 결과를 나타냈다. 이는 실제 현장에서 상황별 매칭 전략 선택이 응답 성능 향상에 기여할 수 있음을 시사한다.

제안된 모델은 현행 소방 규정을 준수하면서 시간 기반 성능 지표를 병행 평가할 수 있는 구조를 갖추고 있으며, 향후 3차원 구조 확장, 확률 기반 화재 발생 모델 반영, IoT 기반 동적 재배치 및 강화학습 기반 자율 최적화 등으로 확장 가능하다.

그럼에도 불구하고, 본 연구는 산업 현장에서 경험에 의존하던 소화기 배치를 정량적·객관적 의사결정 체계로 전환할 수 있는 기반을 제시한다는 점에서 실무적 의의를 가진다. 특히 기존 규정 준수 중심의 정적 배치 방식에서 나아가, 응답시간 기반 성능 평가를 병행함으로써 설계 단계에서 비용과 안전성을 동시에 고려할 수 있는 구조를 제공한다. 이는 중소 제조기업과 같이 안전 설계 전문 인력이 제한된 환경에서 표준화되고 재현 가능한 배치 의사결정을 지원하는 실질적 설계 도구로 활용될 수 있다.

향후 연구에서는 소화기의 가시성(visibility)과 시야 확보 영역을 정량적으로 반영하는 모델 확장이 필요하다. 또한 화재 규모(fire size), 화재 발생 확률, 소화기의 종류 및 소화 능력(capacity)을 함께 고려한 위험도 기반 다목적 최적화 구조로 발전시킬 수 있다. 이러한 확장은 알고리즘 기반 최적화와 전문가 판단 요소를 결합한 하이브리드 안전 설계 체계로의 전환을 가능하게 할 것이다.

본 연구의 핵심 기여점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 소화기 설치 수 최소화와 작업자-소화기-화재 경로 기반 응답 시간 최소화를 동시에 고려한 MILP 통합 모델을 제안하였다.
2. 격자 셀 기반 커버리지 제약을 적용하여 중복 커버 문제를 해결하고 실제 산업 현장의 공간 제약을 정량적으로 반영하였다.
3. 실제 중소 제조기업 사례에 적용하여 모델의 실효성과 적용 가능성을 정량적으로 검증하였다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00236327, 도시가스 배관망 수소혼입 안전성 평가/실증 및 안전기준 개발).

Reference

1. Pandit, S. and Gupta, S., "A Comparative Study on Distance Measuring Approaches for Clustering," *International Journal of*

- Research in Computer Science*, **1**(3), 29-34(2011).
2. Tongthong, T., Nyimin, T. and Peansupap, V., "A System for Developing and Evaluating Fire Extinguisher Plans of Construction Projects in Virtual Environments," *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, **28**, 180-198(2023).
 3. Nam, G. T., "A Study on the Development of AI-Based Firefighting Facility Design Technology through Image Recognition," *Journal of the Korean Society of Disaster Information*, **18**(4), 883-890(2022). (in Korean)
 4. Jeon, E. G., Bae, Y. H., Ahn, S. H., Hwang, C. H., Hong, W. H., and Choi, J. H., "A Survey on the Current Status of Performance-Based Design in Fire Protection Systems through a Comprehensive Review of Design Documents," *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, **33**(5), 50-57(2019). (in Korean)
 5. National Fire Agency (Fire Analysis System Division), Fire Safety Performance Standards for Portable Fire Extinguishers and Automatic Fire Extinguishing Systems (NFPC 101), National Fire Agency Notice No. 2018-14, Administrative Rule, 2018. (in Korean)
 6. Anderson, E. H. and Robin, M. L., "Selection and Placement of Fire Extinguishers," *IPF Magazine*, November Issue, 22-28, 2004.
 7. Koorsen Fire & Security, "Why Is Fire Extinguisher Placement and Accessibility So Important?," Koorsen Blog, April 12, 2024.
 8. O'Connor, B., "Fire Extinguisher Placement Guide," Blog, May 1, 2021.
 9. Unknown, "Where Should Fire Extinguishers be Placed According to Australian Guidelines?," Blog, n.d.
 10. Firecode Safety Equipment Inc., "Best Practices for Fire Extinguisher Placement in the Workplace," Firecode Safety Blog, January 29, 2024.
 11. National Fire Protection Association (NFPA), *NFPA 10: Standard for Portable Fire Extinguishers*, NFPA, Quincy, MA, 2022.
 12. British Standards Institution (BSI), *BS 5306-8: Fire Extinguishing Installations and Equipment on Premises - Selection and Positioning of Portable Fire Extinguishers - Code of Practice*, BSI, London, UK, 2021.
 13. Saito, K., "Optimal Location of Fire Extinguishers in Industrial Facilities Using Mathematical Optimization," *Fire Safety Journal*, **91**, 345-352(2017).
 14. Lee, G. Y., "Fire Risk Analysis and Fire Protection Measures in Industrial Facilities," *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, **35**(2), 33-42(2021). (in Korean)
 15. Guckes, T., "Improving Fire Extinguisher Accessibility Through Workplace Design," *Safety Science*, **152**, 105789(2022).

Authors

Sangwoo Lee: Graduate Student, Department of Disaster, Safety and Sustainability Engineering, Myongji University, Yongin, Gyeonggi-do, 17058, Korea; Principal Professional Engineer, ESG&Smart Factory Support Center, Samsung Electronics Co., Ltd. lepk334@naver.com, check.lee@samsung.com

Dongil Shin: Professor, Intelligent Systems Engineering Lab, Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin, Gyeonggi-do 17058, Korea; dongil@mju.ac.kr