

사업장에 적용 가능한 감염병(COVID-19) 위험성평가 지표 개발

김하경* · 이명하** · 송형준***†

Safety Estimation Index of Infectious Disease (COVID-19) in Workplaces

Ha Kyeong Kim* · Myoung Ha Lee** · Hyung-Jun Song***†

†Corresponding Author

Hyung-Jun Song

Tel : +82-2-970-6387

E-mail : hj.song@seoultech.ac.kr

Received : January 3, 2022

Revised : January 27, 2022

Accepted : March 4, 2022

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : Widespread infectious diseases are a concern for workers working in confined spaces. However, there is no risk assessment index for the risk of infectious disease in the workplace. Therefore, we propose a simple but effective index model to assess the risk of infectious diseases in the workplace. The proposed model identifies the risk of each workplace through an evaluation sheet comprising the frequency and intensity of the infectious disease. The intensity of an infectious disease is generally governed by the density of workers, whereas frequency is the sum of physical-environmental and human management factors. By multiplying intensity and frequency, the risk of the workplace is derived. Through the proposed model, we evaluate the risks of workers at 15 different work sites. The proposed model clearly reveals what should be improved to keep workers safe from infectious diseases and will be helpful in assessing the risk of contagious disease at the work place.

Key Words : COVID-19 group infection, safety at work, risk assessment, infectious disease, estimation

1. 서론

코로나바이러스 감염증(COVID-19)의 팬데믹 상황이 장기화함에 따라 우리 사회의 많은 부분이 변화하고 있으며, 사회 경제적 손실 또한 증가하고 있다. 특히 다수의 인원이 밀집된 실내 공간에 모여야 하는 활동에 많은 제약이 따르고 있다. 코로나19를 분석한 연구에 의하면 실내에서 밀집하여 장시간 동안 노동을 해야 하는 근로 환경이 감염병을 전파하는 요인으로 작용할 수 있다고 지적하였다¹⁾. 코로나의 발생 양상에 관한 사례를 분석한 결과, 밀폐된 실내 환경에서 다수의 사람이 활동하는 공간적 특성과 개인의 행동적 특성이 바이러스의 전파 정도에 영향을 미치는 것으로 나타났다²⁾. 뿐만 아니라 많은 인원이 오랜 시간 체류하며 근무하는 근로 환경의 특성 또한 코로나19 집단 감염에

매우 취약한 것으로 보고된 바 있다.

코로나19 감염병 재난의 발생 이후 다양한 분야에서 이와 관련된 연구들이 활발히 진행되고 있다. 하지만 밀폐된 실내 사업장의 집단감염 사례가 증가하고 있음에도 불구하고 실내 공간의 코로나19 위험성 평가에 대한 연구는 이루어지지 않고 있는 상태이다. 한국을 비롯한 대부분의 국가에서는 마스크 착용, 거리 두기, 개인위생과 같은 개인의 행동 특성을 중심으로 방역지침을 설정하고 있다. 하지만 코로나19의 감염 사례 중 사업장에서 발생한 경우를 살펴보면 개인의 행동 특성 뿐만 아니라 근무환경의 특성에서 비롯된 감염의 사례가 큰 수치를 차지하고 있는 것을 알 수 있다³⁾. 2021년 7월에 발생한 모 백화점의 직원 집단 감염 사례를 보면, 직원들 사이에서 주된 감염이 발생하였으며 협소한 직원 휴게 공간과 미흡한 동선 분류가 주요 감염 원

*서울과학기술대학교 환경공학과 학사과정 (Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

**서울과학기술대학교 안전공학과 학사과정 (Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

***서울과학기술대학교 안전공학과 조교수 (Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

※ 2021년 행정안전부에서 주최하고 한국안전학회에서 주관한 재난안전 논문공모전 수상작입니다.

인으로 작용하였다. 이 경우는 감염에 취약한 근로환경 속에서 집단감염이 어떻게 발생하는지를 잘 나타낸 사례이다. 따라서 이와 같은 집단감염 사례를 예방하기 위해서는 개인에게 부여하는 방역 지침에서 더 나아가 사업장 자체에 적용할 수 있는 다각화된 해결 방안이 필요함을 알 수 있다. 산업안전보건법 제36 조에서는 “근로자가 근무하는 사업장에 존재하는 유해·위험요인을 찾고 부상 및 질병으로 이어질 수 있는 위험성의 크기를 평가하여 산업재해를 예방해야 한다”라고 명시되어 있다^{4,5)}. 시대의 흐름에 따라서 코로나19와 같은 인적, 경제적 문제를 야기하는 고위험군의 감염병에 대해서도 위험성평가가 필요하다. 더 나아가 질병 재난에 대한 위험성 평가는 사업장의 안전보건 수준을 파악하고, 향후 위험요인을 제거하는 등 재난 대응에 있어 중요한 역할을 할 수 있을 것이다. 이에 이 연구에서는 위험성평가 방식을 이용한 ‘코로나19 감염병 재난의 사업장 안전성 평가 지표’를 제안하고 이를 통해 질병 재난의 위험성을 정확히 파악하여, 재난 확산의 방지에 기여하고자 한다.

2. 코로나19 위험성평가 모델 항목 구성

산업안전보건법 제36조에 명시된 ‘위험성평가’란 사업장에 존재하는 유해·위험요인에 인한 부상 및 질병의 발생 가능성(빈도)과 중대성(강도)을 추정하고 위험성(risk)의 크기를 산출하는 일련의 과정을 말한다. 이 과정을 코로나19의 특성에 맞게 변형하여 위험성을 평가하는 지표를 만들고자 한다.

기존 위험성평가의 용어를 감염병 재난의 특성을 고려해서 일부 변형하여 정의할 것이다. 중대성과 발생 가능성을 ‘감염의 강도 (Infectious Intensity)’와 ‘노출수준 (Exposure frequency)’으로, 유해·위험요인은 ‘전파 위험요인’으로 변형한다. 이때 ‘감염의 강도’와 ‘노출수준’을 조합하여 위험성의 크기를 계산하고 최종적으로 ‘위험도’를 도출할 것이다. 앞으로 위 논문에서는 위 과정을 통해 기존 위험성 평가의 ‘중대성’과 ‘발생 가능성’의 용어를 각각 ‘감염의 강도’와 ‘노출 수준’으로 정립한다.

먼저 감염강도의 경우 밀집도와 밀폐도가 낮을수록 코로나19의 감염으로부터 안전하다는 선행 연구 결과^{6,7)}를 기반으로 정하였다. 미국 Massachusetts Institute of Technology의 M. Z. Bazant 교수 그룹의 연구인 ‘Beyond Six Feet: A Guideline to Limit Indoor Airborne Transmission of COVID-19’ 논문에서는 밀폐도, 밀집도, 밀접도가 코로나19의 감염의 중요한 요소임을 지적하였다⁷⁾. 이 논문을

Table 1. Assumption for deriving the intensity of infection

Suppose 1	<ul style="list-style-type: none"> 실내에서 근무하는 사업장을 기준으로 함. Based on indoor workplaces
Suppose 2	<ul style="list-style-type: none"> 공간 크기는 근로자의 대다수가 주로 체류하는 실 사용면적으로 설정함. (사업장 층고는 3.66 m로 고정) A space size is an actual occupied area where majority of workers usually stay. (However, the floor height of the workplace is fixed at 3.66 m.)
Suppose 3	<ul style="list-style-type: none"> 환기율과 재순환율(시간당 공기 순환율) : 1 Ventilation rate and Recirculation rate (air circulation rate per hour): 1
Suppose 4	<ul style="list-style-type: none"> 비말 활동도는 사업장의 모든 근로자가 마스크를 착용하였다고 설정. (마스크의 여과효율과 착용법 준수 사항은 모두가 잘 이행한 상황을 100%로 보았을 때를 기준으로 80%로 설정함) A smear activity level is set to 80% based on 100% of the situation in which all workers at the workplace wear masks.
Suppose 5	<ul style="list-style-type: none"> 호흡률은 일반적 활동(2.35 m²/hr)으로 설정 Breathing rate is set to general activity(2.35 m²/hr)
Suppose 6	<ul style="list-style-type: none"> 호흡기활동은 일상적인 대화 수준(72 q/m³)으로 설정 Respiratory activity is set to the level of daily conversation (72 q/m³)

바탕으로 개발된 ‘COVID-19 Indoor Safety Guideline’ 모델링 프로그램을 통해 실내 공간에서의 공간 규격, 환기율, 여과율, 마스크 사용 여부, 호흡기 활동도 등을 고려하여 코로나19의 확산 정도를 계산할 수 있다. 이때 모델링 식의 결과 값은 ‘공간 크기에 따른 거리 두기 지침을 준수하였을 때의 권고 인원수’로 도출된다. 해당 결과 값은 밀폐도, 밀접도, 밀집도 요소를 포함한 것으로, 최종적으로 모델링식의 가정을 통해 밀집도 (공간 크기 별 인원수)에 관련된 값으로 구할 수 있다. 공간 크기의 권고 인원수보다 실제 인원수가 많을 때, 공간의 밀집도가 높으므로 코로나19의 전파율이 상승한다⁷⁾. 이는 곧 코로나19의 감염 위험성이 높아짐을 의미하며, 따라서 감염의 강도(Intensity)는 ‘감염 발생 시 전파되는 인원의 규모’로 정의한다.

모델링의 변수가 갖는 불확실성을 감소시키고 위험성 평가에 적합한 수치를 도출하고자 Table 1과 같은 가정을 전제로 모델을 설정하였다. 위 가정들을 통해 강도값 도출에 적합한 모델링 변수들을 설정하였다. 가정 1-2는 공간 규격에 대한 기준이다. 가정 3은 추후 노출수준의 환기성을 고려한 항목들을 위해 1로 설정하여 환기가 이루어지지 않는 상황으로 가정한다. 또한 노동자의 마스크 착용 여부와 호흡률과 대화 수준은 평균값을 가진다고 가정하였다. 그리고 이 외에 반영되지 않은 부분은 추후 노출수준의 작업 특성에서 세부 사항을 반영하도록 설계하였다^{8,9)}. 또한 연령대별로 코로나 19 감염에 따른 중증도 (치사율)가 다르기 때문에, 본 연구에서는 감염에 확산 정도만을 고려하였다¹⁰⁾. 향후 작업자의 특성을 기반으로

Table 2. Reference guideline for deriving the exposure frequency

기관	자료
행정안전부 Ministry of the Interior and Safety	<input type="checkbox"/> 코로나19 대비 및 대응방안 <input type="checkbox"/> Precaution for COVID-19. <input type="checkbox"/> 생활 속 거리 두기 기본지침 <input type="checkbox"/> Basic guidelines for keeping distance in daily life.
질병관리청 Korea Disease Control and Prevention Agency	<input type="checkbox"/> 집단감염 역학조사 결과 <input type="checkbox"/> Epidemiological investigation results of group infection.
고용노동부 Ministry of Employment and Labor	<input type="checkbox"/> 코로나19예방 및 확산방지를 위한 사회적 거리두기 지침 <input type="checkbox"/> Guidelines for Social Distancing and Prevent Spreading of COVID-19
안전보건공단 Korea Occupational Safety & Health Agency	<input type="checkbox"/> 코로나 19 감염예방 안전작업가이드 <input type="checkbox"/> COVID-19 Infection Precaution Safety Work Guide
Public Health England (PHE)	
Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS)	<input type="checkbox"/> 코로나19 감염예방 및 안전한 일터 조성방안 <input type="checkbox"/> A plan to prevent COVID-19 infection and create a safe workplace.
Health and Safety Executive (HSE)	

주요 작업자 군의 중증도를 고려한 보정 절차가 추가된다면, 작업장의 위험성을 정확하게 평가 할 수 있을 것으로 예상된다.

한편 노출수준(Frequency) 평가 모델을 개발하기 위해 국내외 방역 관련 기관에서 제공하는 자료 Table 2를 참고하였다. 국·내외의 방역지침서를 분석한 결과 지침서 모두 ‘관리도’와 ‘방역지침 준수’의 내용을 강조함을 확인할 수 있었다. ‘관리도’는 시설 및 인력의 관리로, 방역관리자 지정, QR 체크인, 시차 출퇴근제와 같은 항목을 포함한다. ‘방역지침 준수’는 국가에서 시행 중인 방역 사항으로, 공통적으로 거리 두기, 소독 등의 항목을 제시한다. 시차 출퇴근제나 거리 두기 등의 항목이 지켜지지 않는다면, 감염자와 접촉하거나 공기 중 전파의 위험이 커진다. 이는 곧 코로나19 감염 위험에 더 많이 노출됨을 의미한다. 따라서 노출수준은 ‘전파 위험요인에 의해 감염에 노출될 가능성’으로 정의하며, ‘관리도’, ‘방역지침 준수’에 해당하는 항목을 분석하여 평가 모델에 반영하였다.

대부분 지침서에는 사업장이 주체가 되어 할 수 있는 항목과 개인이 지켜야 할 행동 수칙이 혼재되어 있다. 이 연구의 목적은 ‘사업장의 안전성 평가 지표’ 제공으로, 코로나19의 위험도를 구체적으로 제안하고자 하였다. 따라서 사업장이 주체가 되어서 수행해야 할 사항은 ‘물리·환경적 지표’로 개인의 행동 수칙은 ‘인적 지표’로 분류하여 모델에 반영하였다.

3. 코로나19 위험성평가 모델 개발

3.1. 위험성평가 절차

이 연구에서는 체계적인 코로나19 위험성평가를 위해 Fig. 1과 같은 절차를 통해 사업장의 위험도를 도출하고자 한다. 2장에서 도출한 인자들을 바탕으로 감염강도와 노출수준의 항목을 결정하였다. 프로세스는 감염강도 및 노출수준 선정, 위험성 계산, 위험도 도출의 단계 순으로 진행된다. 감염강도 선정 단계에서는 사업장의 권고 인원수를 구하고 그 값과 실제 근로 인원수와 비교한 값인 E_r 를 식(2)를 통해 구한다. 이후 구간별 강도 선정표 Table 3을 통해 강도 값을 선정한다. 노출수준 선정 단계에서는 물리·환경적 요인 선정표와 인적 요인 선정표인 Table 4를 통해 각 항목의 전파 위험요인에 대한 노출수준 값을 선정한다. 선정된 값을 바탕으로 개별 항목의 위험성을 산정하는 식(3)과, 각 지표의 위험성을 산정하는 식(4)와 (5)로 위험성을 계산한다. 이후 선정표 Table 5를 통해 위험도를 도출한다. 이는 곧 코로나19의 위험성 지표이자, 사업장의 안전성을 평가할 수 있는 지표이다.

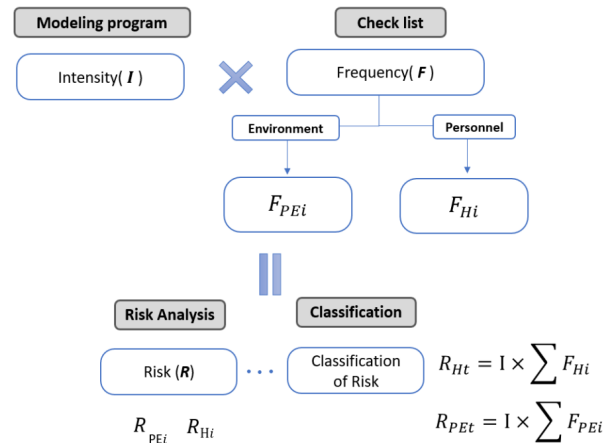


Fig. 1. Risk assessment process for COVID-19.

3.2 감염강도 측정 모델

감염 발생 시 전파 규모를 의미하는 감염강도는 그 위험도에 따라서 1-5등급으로 나누었다. 1등급인 경우 감염자가 발생했을 때 사업장 내 전파되는 규모가 작고, 5등급인 경우 감염자가 발생했을 때 사업장 내 전파되는 규모가 큼을 의미한다.

이 논문에서는 사업장의 공간 크기에 따른 권고 인원수를 도출하기 위해 앞에서 언급한 모델링 프로그램을 통해 얻은 데이터를 회귀분석 하여서 다음과 같은 식을 도출하였다⁸⁾(Fig. 2. 참조).

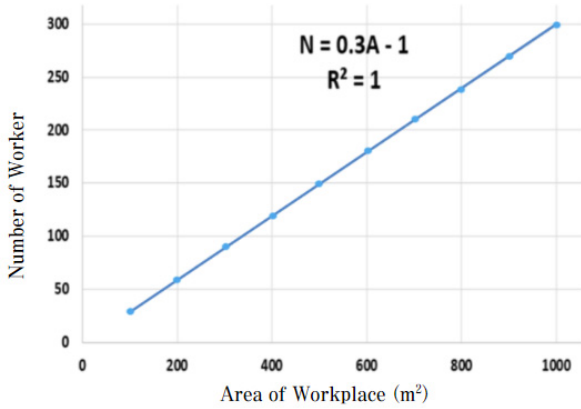


Fig. 2. Recommended number of workers as a function of area.

Table 3. Classification of the intensity based on E_f

강도(intensity)	E_f (%)
1	<15
2	16 - 30
3	31 - 50
4	51 - 70
5	71<

근로자가 주로 체류하는 사업장의 실사용 공간 크기 (A)와 권고 인원수 (N) 사이의 상관관계를 식 (1)로 나타낸다.

$$N = 0.3A - 1 \quad (1)$$

여기서 권고 인원수는 사업장 공간 크기에서 거리 두기 지침을 준수하였을 때의 권고 인원수를 뜻한다. 이를 기반으로 강도 등급을 산정하기 위해 식 (2)를 사용하고자 한다.

$$\frac{N_r(\text{실제인원수}) - N(\text{권고인원수})}{N(\text{권고인원수})} \times 100 = E_f(\%) \quad (2)$$

여기서 N_r 은 실제 사업장의 근무 인원수이다. 식 (2)를 통해 구한 공간당 초과 인원수의 비율인 E_f (%)을 바탕으로 해당 범위에 따라 강도 등급을 Table 3을 통해 선정한다. 따라서 감염병의 전파 강도는 1-5까지의 값으로 나타낼 수 있다.

3.3 노출수준 측정 모델

노출수준은 ‘감염에 노출될 수준’을 뜻하며, 점수가 높을수록 전파 위험 요인이 지켜지지 않아 감염에 노

출될 가능성이 높은 것을 의미한다. 반대로 낮은 점수의 경우 전파 위험 요인이 잘 지켜져 감염에 노출될 가능성이 낮음을 의미한다. 노출수준에서 중요한 것은 전파 위험요인에 노출 정도이다. 이에 2장에서 사업장 차원의 관리와 개인행동 수칙을 기준으로 전파 위험요인을 물리·환경적 요인과 인적 요인으로 분류하였다. 이러한 분류 기준을 기반으로 Table 4와 같은 이를 평가할 수 있는 표준 양식을 만들었다. 이 표는 고용노동부에서 작성한 “코로나19 예방 및 확산 방지를 위한 사회적 거리 두기 지침”, 질병관리청의 “코로나19 유행 상황에 따른 생활 속 거리 두기 이행방안 연구”와 같은 Table 2에 나오는 자료들을 기반으로 작성하였다. 단 일부 기준의 경우 3단계 혹은 4단계로 구성된 자료의 평가 항목을 본 기준에 맞게 5단계로 재구성하였다. 예를 들어 식사 구분 및 가림막의 경우 고용노동부의 “코로나19 방역 수칙 준수 자율 점검표”에서 2단계 (예/아니오)의 평가를 세분화하여 적용함으로써 사업장의 상황을 좀 더 정확하게 반영할 수 있도록 하였다. 단 현재까지 사례 연구 부족으로 각 요인들에 값에 따른 효과는 차후 연구에 따라 수정이 필요하다.

3.3.1 물리·환경적 지표

물리·환경적 지표는 근로 시설 및 환경에 대해 평가하는 항목으로 개인의 행동 요인을 최소화하여 사업장에서 발생할 수 있는 위험성을 평가하는 데 이용된다. 이 지표는 Table 4의 ‘물리·환경적 전파 위험요인’ 파트를 통해 측정할 수 있다. 물리·환경적 지표는 ‘환기성’, ‘혼잡도 관리’, ‘시설물 관리’ 세 분야로 나누어 평가한다. 물리·환경적 지표는 환기성에 대한 세부 항목이 3개, 시설물 관리 분야는 3개, 혼잡도 관리 분야 4개로 구성되어 있다. 먼저 ‘환기성’은 환기, 환풍기 가동 시간, 냉·난방기 가동시간으로 밀폐된 공간에서 감염 위험을 결정짓는 항목이다. ‘혼잡도 관리’는 체류시간, 번잡도, 동선 분류, 시차 운영으로 사용인원을 제한 및 분류하여 집단 감염의 노출을 최소화할 수 있는 항목이다. ‘시설물 관리’는 투명 가림판 설치, 위생용품 지급, 공유 공간의 개수는 사업장 내 시설물을 관리, 및 제한하여 감염 위험의 노출수준을 조절할 수 있다.

물리·환경적 지표를 통해 사업장 근무환경을 평가하고, 사업장의 환경이 코로나 집단감염의 위험에 얼마나 노출되어 평가할 수 있다.

3.3.2 인적 지표

인적 지표는 Table 4의 ‘인적 전파 위험요인’ 파트를

Table 4. Check sheet for evaluating R_{PEI}

			점수(Points)				
			Excellent	Good	Moderate	Poor	Very poor
			1 pts	2 pts	3 pts	4 pts	5 pts
물리·환경적 전파 위험요인 (Physical & Environmental factor, R_{PEI})	환기성 Ventilation	환기 시간 (Ventilation time)	Always	Every hour	Every 3Hrs	Every 5Hrs	None
		가동 시간 (Duration)	Always	>5 Hrs	>3 Hrs	> 1 Hr	None
		냉·난방기 가동 (Cooling/heating)	가동 안함 (None)	1-3 hrs/day	3-5 hrs/day	5-7 hrs/day	상시 (Always)
	시설물 관리 Facilities	가림판 설치 (Panel installation)	All	3/4	2/4	1/4	None
		인당 위생용품지급 (Sanitizer per worker)	< 5	5 - 10	10 - 20	20 - 30	> 30
		공유공간의 개수 (No. shared spaces)	None	1 - 3	4 - 6	7 - 9	Above 10
	혼잡도 관리 Crowded-ness	작업장 체류시간 (Workhour at the site)	Work from home	1 - 3 hrs	3 - 7 hrs	7 - 9 hrs	Over 9 hrs
		재택근무 비율 (Ratio of work from home)	All	>3/4	3/4-2/4	2/4-1/4	>1/4
		이동 동선 공유 (Sharing walkways)	None	< 1/4	1/4-2/4	2/4-3/4	All
		시차 출퇴근/식사 운영 (Working & break time)	None	Only break time	One of them	Working & Lunch time	All
인적 전파 위험요인 (Human factor, R_{HI})	인력관리 (Management of worker)	전담 조직/전담자 지정 (Quarantine manager/team per workers & customers)	50	100	200	300	None
		관리자가 방역지침 교육 (Education of guidelines)	Once/week	Twice/month	Once/month	Quarterly	None
		출퇴근 명부 작성/관리 (Record of workers)	All	1-3/4	3/4-2/4	2/4-1/4	>1/4
		일용직 노동자 관리 (Control of subcontract)	All	1-3/4	3/4-2/4	2/4-1/4	>1/4
		방문자 명부 작성/관리 (Record of visitors)	All	1-3/4	3/4-2/4	2/4-1/4	>1/4
		인력에 대한 체온측정 (Monotroing body temp.)	All	1-3/4	3/4-2/4	2/4-1/4	>1/4
	소독 (Disinfection)	다양한 공간 소독 (Regular disinfection)	Always	3 times /week	twice/week	once/week	None
		개인 위생 준수 (Personnal regulation)	Evey worker	> 80%	> 60%	> 40%	< 20%
		공용 물품 소독 (Public items)	Every 2 hrs	Twice/day	Once/day	1-3 times/week	None
	작업특성 (Charateristics of job)	신체운동을 동반정도 (Degree of dynamic work)	very light (RMR* < 0.9)	light (1.0-1.9)	moderate (2.0-3.9)	heavy (4.0-6.9)	very heavy (>7)
비말의 발생 정도 (Spread of doplets)		Very Low	low	moderate	high	Very high	
지속적인 공동생활 여부 (Dormitory, Dining, etc)		None	only dining	only dormitory	dining & dormitory	All (ex.shower)	

* Relative Metabolic Rate (작업자 에너지 대사율)

통해 측정하며 개인의 행동에 의한 노출수준을 평가할 수 있다. 인적 지표에서는 ‘인력 관리’, ‘소독’, ‘작업 특성’ 세 분야로 평가한다. ‘인력 관리’는 체온 측정, 명부 관리와 같이 각 항목을 이행하기 위해 개인의 행

동 준수가 필요한 경우를 말한다. ‘소독’은 주기적 소독, 개인위생, 공용 물품 소독으로 공유 공간에서 발생하는 감염을 최소화할 수 있는 항목이다. ‘작업 특성’은 직업적인 특성을 고려하여, 신체 활동 정도, 비말

확산 정도, 지속적인 공동생활과 같이 코로나에 취약한 근무 형태를 평가한다. 전체 인적 요인은 인력 관리 내용이 50%, 소독 관련 부분이 25%, 작업 특성이 25%로 구성되어 있다. 인적 지표를 통해 사업장에서 근무하는 인력이 코로나 집단감염에 얼마나 노출될 가능성이 있는지 평가할 수 있다.

두 지표의 경우 일반적인 사업장의 감염병에 대한 안전성을 평가하는데 적합하나, 일부 사업장의 경우 사업장의 특성에 따라 가중치를 적용하거나 변화할 필요도 있다. 예를 들어 고강도 업무를 많이 요하는 체력 단련 시설이나, 환기가 힘든 클린룸 중심의 반도체 사업장의 경우 표에 환기 부분과 신체운동 부분에 대한 수정을 통해 사업장에 맞게 변형할 필요가 있다.

3.4 위험성 결정

코로나19의 사업장 내 위험성(R)의 크기는 식 (3)에 나와 있듯 감염강도(I)와 노출수준(F)의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$R_{(위험성)} = I_{(감염의 강도)} \times F_{(노출수준)} \quad (3)$$

R의 값이 클수록 감염강도가 강하고 노출이 쉽게 이루어지는 상황이고, 반면 값이 작을수록 감염의 강도가 약하며, 전파가 발생하지 않는 상황을 의미한다.

코로나19는 여러 위험 항목이 유기적으로 연결되어 있고, 선정한 항목 중 하나라도 제대로 이행되지 않을 시에는 감염의 위험성이 증가하기 때문에 선정한 항목 전체에 대한 위험도를 아는 것이 중요하다. 또한 사업장의 물리·환경적 위험성(R_{PE})과 인적 위험성(R_{H})을 구별하여 제안함으로써 개선점을 명확히 할 수 있다는 점에서 지표별 위험성을 산정하는 과정이 필요하다.

$$R_{PE} = I \times \sum F_{PE} \quad (4)$$

$$R_H = I \times \sum F_H \quad (5)$$

식 (4)를 통해 물리·환경적 지표에 의한 위험성을 계산할 수 있고 식 (5)를 통해 인적 지표에 의한 위험성을 계산할 수 있다.

$\sum F_{PE}$ 는 물리·환경적 노출수준의 총합으로 10개의 항목이 1-5점까지 존재한다. 따라서 최소 10점에서 최대 50점까지 점수를 가질 수 있다. 여기에 식 (4)에 따라서 노출 강도의 값을 1-5까지 곱해주면 물리·환경적 위험성은 10-250점 사이의 값을 가질 수 있다.

Table 5. Classification of R_{PE} and R_H

Classification	R_{PE}	R_H
IV	>191	>226
III	126 - 190	151 - 225
II	61 - 125	76 - 150
I	< 60	< 75

유사하게 $\sum F_H$ 은 인적 노출수준의 총합으로 12개 항목이 1-5점까지 존재한다. 단 ‘개인위생 준수’의 경우 이행과 불이행으로 2개의 선지로 구분하여 각 2점과 4점을 부여하였다. 그 결과 인적요인에 의한 노출수준은 최소 13점에서 최대 59점까지 점수를 가질 수 있다. 따라서 식 (5)에 따라 계산하면 인적 위험성은 13-295점 내에서 존재한다.

이 값을 바로 이용하여 위험성을 평가하여도 무방하지만, 너무 복잡한 계산과 큰 값으로 인해 사업장에 직관적으로 적용하는데 어려움이 예상된다. 이에, Table 5와 같이 As Low As Reasonably Practicable 원칙을 이용하여 위험도를 I-IV 등급까지 산정하였다. I 등급의 경우 사업장이 감염병에 대한 대처가 잘 되어 있어서, 널리 수용 가능한 영역이고, II, III 등급의 경우 위험도가 높지만 허용 가능한 영역, IV 등급의 경우 수용이 불가능한 영역으로 구분하였다¹¹⁾. 이 연구에서는 Table 5를 기반으로 위험도를 선정한 내용으로 평가하였으나, 실제 사업장에 적용 시 이 값을 일부 변경하여 사용하여도 무방할 것으로 보인다.

4. 개발된 모델을 이용한 사업장 평가

앞서 제안한 감염병 재난의 위험성평가를 다양한 사업장에 적용하기 위해 사례연구를 수행하였다. 15군데의 사업장을 직접 방문 혹은 근로자 인터뷰를 통해 정보를 얻어 평가하였다. 직접 방문한 사업장은 일반인의 출입이 가능하고, 보안 등급이 낮은 공간으로 은행(Bank), 주민센터(Community center), 내과 병원(Family clinic), 교복 수선 공장(Clothing repair shop), 키즈카페(Indoor playground), 학원 강의실(Private institute), 대학교 사무실(Department office of university)이다. 한편 보안 등급과 감염병 관리를 위해 일반인의 출입이 어려운 공간에서는 안전보건업무 담당자 및 보건관리자를 통해 이루어졌다. 이렇게 평가가 이루어진 공간은 광고 회사 사무실(Advertising company), 증권 회사 사무실(Securities company), 콜센터 사무실(Call center), 엔지니어링 회사 사무실(Civil engineering company), 전자 회사 사무실(Electronics company), 정부 출연 연구소(Research Institute),

유리 제조공장(Glass manufacturing factory), 초등학교 교실(Classroom)이다. 인터뷰 조사의 경우 정확한 조사와 담당자의 주관적 판단이 평가의 결과에 반영되는 것을 최소화하기 위해 평가 전 ‘평가 시 주의사항’에 대한 안내문을 배부하여 간단한 교육을 실시하였다. 연구한 결과 Fig. 3과 같은 분포도로 나타낼 수 있었다. 이 연구에서는 가능한 사업장의 특성을 반영할 수 있는 공간을 지정하여 평가하였으나, 사업장마다 차이로 인해 본 결과와는 조금씩 다르게 나타날 수도 있다.

Fig. 3은 감염강도 등급을 X축, 노출수준을 Y축으로 설정하여 각 사업장의 위험성을 나타낸 분포도이다. 분포도 (a)는 물리·환경적 지표와 인적 지표를 합산한 값을 나타낸 것이다. Fig. 3의 (a)를 통해 각 사업장을 4가지 Group으로 나눌 수 있었다. Group 1은 감염강도

와 노출수준이 낮은 사업장으로 감염병 재난에 상대적으로 안전한 사업장이다. 주로 정해진 노동자가 정해진 시간 동안 근로하는 환경이다. Group 2는 감염강도는 높은 반면 노출수준이 낮은 사업장으로 다수의 인원이 근무하는 사무공간이나, 상업시설이 주로 이 그룹에 속하였다. 이 경우 불특정 다수가 이용하는 공간으로 인원에 대한 통제가 어려운 환경이다. Group 3는 감염강도는 낮지만 노출수준이 높은 사업장으로 공장에서 소수의 노동자가 근무하는 환경이 주를 이룬다. 공간은 매우 넓으나 작업자들에 대한 방역관리가 잘 이루어지지 않는 환경이다. 마지막으로 가장 위험한 Group 4는 감염강도와 노출수준이 높은 사업장으로 밀집도가 높으면서 불특정 다수가 이용하는 사업장이 주로 이에 해당한다.

각 Group에 해당하는 사업장을 확인인 후 ‘물리·환경적 지표’와 ‘인적 지표’로 분류하여 측정하였을 때의 값이 (a)의 양상과 동일하게 발생하는지 확인하였다.

분석 결과 Fig. 3 (a)의 분포도와 Fig. 3 (b), (c)는 대체로 비슷한 분포를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이는 노출수준의 전체 지표가 각 물리·환경적 지표와 인적 지표를 대표한다는 분석이 가능하다. 하지만 지표 내 다른 색으로 표시된 지점 [물리·환경 지표 : 전자 회사 사무실, 주민센터], [인적 지표 : 증권 회사, 학원 강의실, 광고 회사 사무실, 정부 출연 연구소]와 같이 Fig. 3 (a)의 전체 지표와 차이를 보이는 지점이 존재하였다. 전자 회사 사무실의 경우 한정된 공간에서 시설 배치가 잘 지켜지지 않아 물리·환경적 위험성은 높았으나, 개인행동 수칙은 철저히 관리가 되어 인적 위험성은 매우 낮은 편이었다. 반면 증권 회사 사무실과 학원 강의실의 경우 다양한 인원이 출입하여 인적 관리가 잘되지 않는 문제점으로 인해 두 지표의 차이가 발생하였다. 이처럼 각 사업장의 특성에 의해 물리·환경적 지표와 인적 지표의 결과가 다르게 발생하기도 한다. 따라서 이 논문에서 연구한 위험성평가 모델을 사용하여 각 사업장의 위험도를 ‘인적 지표’와 ‘물리·환경적 지표’로 분류하여 평가할 수 있고, 이를 기반으로 지표별 개선책을 강구하여 감염병의 위험성을 낮출 수 있다.

앞서 제안한 R_{Ht} , R_{PEt} 를 통해 ‘인적 지표’와 ‘물리·환경적 지표’의 위험성을 계산하여 각 사업장의 위험성을 수치화하였다(Fig. 4-5). 이 값을 정리하면 Table 6-7과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 바탕으로 사업장의 위험도를 산정하였다. 위험성을 두 지표로 분류하여 표시한 이유는 각 사업장에 어떠한 개선을 통해 위험성을 낮출 수 있는지 명확하게 표시하기 위해서이다.

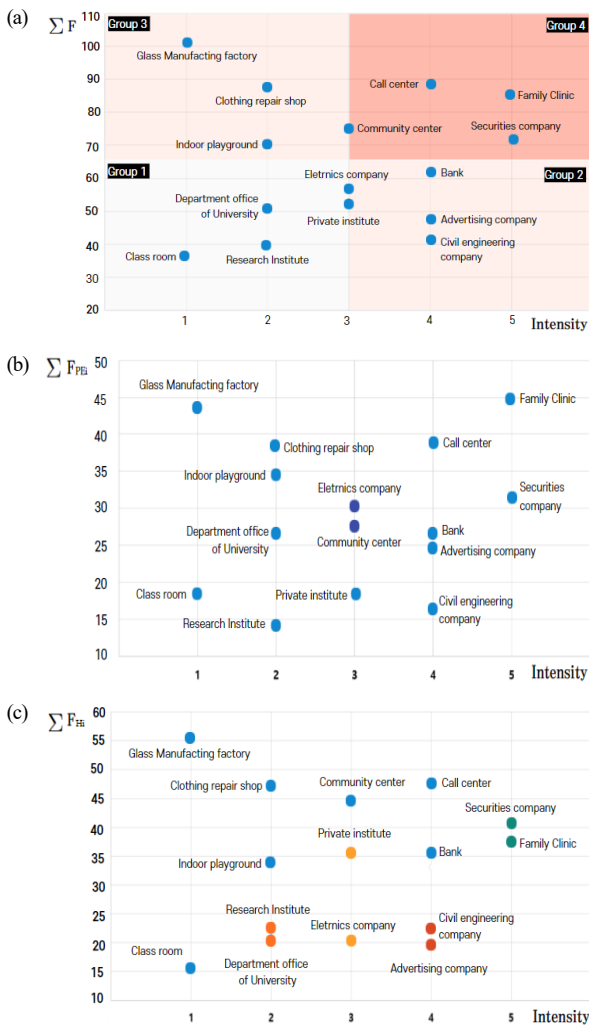


Fig. 3. (a) Exposure frequency–intensity, (b) Phycial environmental frequency–intesity, and (c) Human exposure frequency–intensity relationship at 15 different workplace.

물리 환경적 위험성 (R_{PEt})

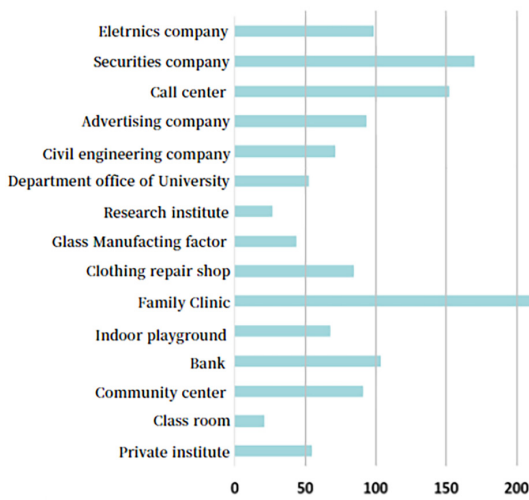


Fig. 4. R_{PEt} of 15 different workplaces.

인적 위험성 (R_{Ht})

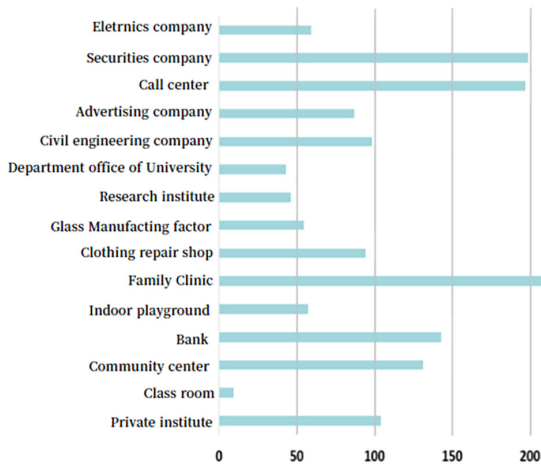


Fig. 5. R_{Ht} of 15 different workplaces.

개발된 모델을 이용하여 사업장 15곳에 ‘코로나19 위험성평가’를 시행한 결과, 사업장 특성에 따라 비슷한 분포와 위험도 수준을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 가장 고위험군인 IV단계에는 ‘개인 내과 병원’이 속하며, 이곳은 다중이용시설로 분류되는 장소이다. 단 이 연구에서 적용한 개인 병원의 경우 평가 당일 백신 접종으로 인해 많은 인원이 병원에 존재하여 인당 밀도가 매우 높아 혼잡도 관리가 어려웠다. 또한 인력 관리, 소독, 시설물 관리가 매우 힘든 상황이었다. 혼잡도가 낮아지는 일반적인 상황에서는, 인적요인 관리가 잘 이루어지고 물리·환경적 요인이 개선되어 위험성이 낮아질 것으로 예상된다. 위험도 III단계에는 증권회사, 은행과 같이 다중이용시설과 사무실이 혼재된 사업장

Table 6. Classification of infection risk based on physical and environmental factors at 15 different workplaces

Classification	R_{PEt}	Workplaces
IV	191 <	Family clinic
III	126 - 190	Call center, Securities company
II	61 - 125	Civil engineering company, Advertising company, Electronics company, Clothing repair shop, Indoor playground, Community center, Bank
I	< 60	Private institute, Research institute, Glass manufacturing factory, Class room, Department office of University

Table 7. Classification of infection risk based on human-related factors at 15 different workplaces

Classification	R_{Ht}	Workplaces
IV	226 <	Family clinic
III	151 - 225	Securities company, Call center, Bank
II	75 - 150	Community center, Advertising company, Civil engineering company, Private institute, Clothing repair shop
I	< 75	Electronics company, Research institute, Glass manufacturing factory, Department office of University, Indoor playground, Class room (Elementary school)

이 속한다. 콜센터의 경우 사무실만 있는 유형이었으나 ‘비밀 확산 정도’ 항목에서 취약성을 보여 III단계로 분류되었다. 위험도 II단계의 사업장은 전자 회사, 엔지니어링 회사, 광고 회사 등으로 사무실로 이용되는 사업장이라는 특성이 나타났다. 키즈 카페, 교복 공장 과 같이 부지가 넓어 ‘감염강도’가 낮게 측정된 사업장의 경우도 II단계로 분류되었다. 물리·환경적 지표의 위험도와 인적 지표의 위험도에서 공통적으로 I단계인 사업장은 유리공장, 대학교 사무실, 정부 출연 연구소, 초등학교가 있었는데 이들의 특징은 모두 넓은 공간으로 ‘감염강도’가 낮다는 공통점을 갖고 있다. 초등학교의 경우 철저한 방역 수칙 준수가 이루어지고 있어 가장 낮은 위험도를 갖는 것으로 판단되었다.

위 평가 모델 사례연구를 통해, 각 사업장 유형에 따라 코로나 감염의 특성이 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 병원의 경우 공간이 작고, 최근 백신 접종자들에게 의해 공간 대비 인원수가 많은 상태였다. 또한 초등학교는 학급당 인원수가 20명 내외로 다른 초등학교에 비해 적은 인원수임을 확인할 수 있었다. 따라서 조사한 사업장은 각 사업장의 개개의 특성을 반영한 것으로, 모든 사업장 유형을 대변하는 것은 아님을 유의해야 한다. 또한 ‘감염강도’선정을 위해 적용된 모델의

경우 2020년에 개발된 지표들을 기반으로 제시된 모델 이기에, 감염성이 더 높은 변이(e.g. SARS-CoV-2 Delta variant, Omicron variant 등)로 인한 감염병 재난의 위험성 평가에 적용하는 데 한계가 있다. 하지만 향후 다양한 변이들에 대한 수학적 모델들이 제시된다면, 이에 맞게 변형해서 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 중증도에 대한 내용이 향후 반영되면, 작업자 안전 확보에 더 많이 기여할 수 있을 것이다.

5. 결론 및 고찰

이 연구에서는 사업장의 근로자를 대상으로 코로나 19 집단감염의 위험성을 평가하는 지표를 제안하였다. 선행된 연구 자료를 통해 코로나19에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 그 결과 밀폐, 밀접, 밀집, 관리도, 방역지침 준수를 주요 인자로 선정하였고, 이를 ‘감염강도’와 ‘노출수준’으로 분류하여 평가에 이용하였다. 제안한 평가 모델은 단위 면적당 인원수를 기반으로 감염강도를 선정하고, 개발된 표를 이용하여 ‘노출수준’을 평가한다. 노출수준의 경우 물리·환경적 요인과 인적 요인으로 분류하였다. 그리고 노출수준과 감염강도를 곱하여 R을 계산하는 방식으로 각 사업장의 감염병 재난에 대한 위험성을 계산하고, 최종적으로 위험도를 도출하였다. 이 모델을 이용하여 15곳의 사업장을 조사한 결과 크게 4가지 Group으로 나뉘는 양상을 확인할 수 있었다. 제안된 모델을 통해 각 사업장의 위험성을 측정하여 위험도를 확인할 수 있었다. 또한 물리·환경적 지표와 인적 지표에 대한 수치를 분류하여 제공함으로써, 사업장 내 개선 방향을 각 지표별로 제시할 수 있을 것이라 예상된다.

References

1) A. Kiaghadi, H. S. Rifa and W. Liaw, “Assessing COVID-19 Risk, Vulnerability and Infection Prevalence in Communities”, PLOS ONE, Vol. 15, pp. 1-21, 2020.

2) Q. J. Leclerc, N. M. Fuller, L. E. Knight, S. Funk and G. M. Knight, “What Settings Have Been Linked to SARS-CoV-2 Transmission Clusters?”, Wellcome Open Research, Vol. 83, No. 5, pp. 1-14, 2020.

3) J. H. Lee, M. S. Park and S. W. Lee, “The Transmission Dynamics of SARS-CoV-2 by Setting in Three Waves in the Seoul Metropolitan Area in South Korea”, Health and Social Studies, Vol. 41, No. 2, pp. 7-26, 2021.

4) I. J. Shin, “Comparative Study on the Institutional Framework of Risk Assessment between German, UK and Korea, Japan in Asian Countries”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 28, No. 1, pp. 151-157, 2013.

5) G. S. Cho, “Application of JSA and Checklist in Asbestos Sealing”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 35, No. 2, pp. 61-66, 2020.

6) D. W. S. Wong and Y. Li, “Spreading of COVID-19: Density Matters”, PLOS ONE, Vol. 15, No. 12, pp. 14-30, 2020.

7) M. Z. Bazant and J. W. M. Bush, “Beyond Six Feet : A Guideline to Limit Indoor Airborne Transmission of COVID-19”, PNAS, Vol. 118, No. 17, pp. 1-12, 2021.

8) J. K. Cho, “Suspected Cases of Air Transmission of COVID-19, Air Conditioning of Buildings, and Ventilation Methods”, Air Cleaning Technology, Vol. 33, No. 4, pp. 9-16, 2020.

9) S. E. Cha, J. S. Jo, J. E. Jo, W. K. Lee and D. C. Kim, “Characterizing the Spatial Distribution of COVID-19 in South Korea”, Journal of Korean Society for Geospatial Information Science, Vol. 29, No. 2, pp. 17-25, 2021.

10) M. Elisabeth, “Covid-19: Death Rate is 0.66% and Increases with Age, Study Estimates” British Medical Journal, Vol. 369, m1327, 2020.

11) H. Pike, F. Khan and P. Amyotte, “Precautionary Principle (PP) versus As Low As Reasonably Practicable (ALARP): Which one to use and when”, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 137, pp. 158-168, 2020.