

Analysis of Hazardous Risk Factor in Underground Logistics Scenario using Urban Railway

Jiyeon Ha¹, Uri Chae², Jinwon Lee³, Jaejin Hwang⁴, Kyung-Sun Lee¹

¹Division of Energy Resources Engineering and Industrial Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 24341

²Department of Advanced Logistics System Research, Innovative Transportation and Logistics Research Center, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, 16105

³Department of Industrial & Management Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, 25457

⁴Department of Industrial and Systems Engineering, Northern Illinois University, Dekalb, 60115-2828

도시철도를 활용한 지하물류 시나리오 상의 유해위험요인 분석

하지연¹, 채우리², 이진원³, 황재진⁴, 이경선¹

¹강원대학교 에너지자원산업공학부(산업공학전공)

²한국철도기술연구원 미래교통물류연구소 첨단물류시스템연구실

³강릉원주대학교 산업경영공학과

⁴노던일리노이대학교 산업공학부

Corresponding Author

Kyung-Sun Lee

Division of Energy Resources Engineering
and Industrial Engineering, Kangwon

National University, Chuncheon, 24341

Email : ksunlee@kangwon.ac.kr

Received : April 23, 2024

Revised : June 16, 2024

Accepted : June 21, 2024

Objective: The purpose of this study is to derive harmful risk factors that may occur during the operation of an urban logistics system, evaluate and analyze the risk factors, and propose a system that requires proactive prevention.

Background: Globally, the digital technology of the 4th Industrial Revolution is being applied to the logistics industry, requiring innovative changes in the logistics system. The need for research on underground logistics systems utilizing urban railways is increasing due to social problems such as traffic congestion and inconvenience, as well as problems such as increased burden on couriers due to increased delivery costs. However, the analysis of harmful risk factors that must be considered when building a new system is still insufficient.

Method: This study derived harmful risk factors that may occur during system operation based on the results of analysis of the operation scenario of the urban underground logistics system. Harmful risk factors were classified by referring to KOSHA-GUIDE and the Ministry of Employment and Labor's Guide to Creating Industrial Accident Occurrence Records. Afterwards, the relevant risk factors were classified through 4M risk assessment and evaluation item analysis, and frequency analysis was performed to analyze systems in need of prevention and suggest improvement measures.

Results: In urban underground logistics scenarios, harmful risk factors such as musculoskeletal disorders, getting caught, and falling are classified through 4M analysis, and improvements to prevent accidents, safety education, and technology development are determined by considering collisions with AGVs and risks in the cargo loading process suggested. Additionally, we sought ways to increase the safety of the working environment and reduce the risk of musculoskeletal disorders and accidents.

Conclusion: This study classified and analyzed harmful risk factors that may occur in urban underground logistics scenarios using 4M risk assessment and proposed a system for accident prevention. This is expected to contribute to improving the safety and efficient construction of the urban logistics system.

Application: The results of this study can help develop a practical operating system that considers safety in the urban underground logistics industry and contribute to building an efficient system.

Keywords: Hazardous risk factor, Urban railway, Underground logistics scenario, Prevention of safety accidents

1. Introduction

전세계적으로 빠른 속도로 획기적인 기술이 등장하고 있으며, 이러한 기술은 전 산업분야에 혁신적인 변화를 도모하고 있다(Song and Lee, 2023). IOT, 인공지능, 빅데이터, 공유플랫폼 등의 4차산업 혁명 디지털 기술을 활용하고자 하는 노력은 물류산업에서도 활발하게 진행되고 있다(Rajamanickam et al., 2023). 물류산업은 온라인쇼핑과 이커머스 시장의 확대에 의한 변화와 급속한 도시화로 인한 구조적 변화를 직면하고 있다(Campisi et al., 2023). 특히 도시에 인구가 집중됨에 따라서 지방중심 물류 시스템에서 도심중심 물류 시스템으로 변화가 요구되고 있는 실정이다(Tutino and Melosi, 2019).

도심중심 물류 시스템은 화물차 증가로 교통혼잡과 통행불편 등의 사회문제와 배송비용 증가로 인한 택배기사 부담이 증가하는 등의 문제가 야기되고 있으며, 높은 지가 및 주민반대로 인한 도심 내 물류 인프라 구축의 한계 등의 문제가 동반되고 있다. 또한 택배 과포장, 포장 폐기물 증대, 화물차 대기오염 등의 환경문제와 택배 속도 경쟁에 따른 근로자의 사고위험 노출 증가가 사회적 문제로 화두가 되고 있다(Ministry of Land, 2020). 최근 국토교통부에서는 국가물류기본계획(2016~2025)을 수립하고 사회구조 변화에 따른 물류미래상으로 물류산업에 로봇도입, 지하공동물류 시스템 개발, 주민친화형 공동 물류시설 구축, 스마트폰, SNS를 통한 개인의 물류 시장 참여 및 권한 확대 등의 추진하고 있다(Ministry of Land, 2016).

Moon et al. (2021)의 연구에서는 기존 운수 사업인 지하철을 활용하여 물류 이동과 보관, 배송 등과 같은 부가적인 서비스를 연계하고자 하는 연구를 수행하여 물류배송에 필요한 물류시설을 기존 도시의 지하철 역사에 설치하여 도시의 비대면 물류배송의 가능성을 확인하였다. 또한 로보스토크(Robo-stow), 키바(Kiva) 로봇과 같은 로봇이 물류를 분류 저장 반출하는 무인 스마트 물류창고 구축의 필요성을 언급하였다. 국외에서도 도시철도 인프라를 활용하여 물류 시스템을 구축하기 위한 연구개발이 지속적으로 시도되고 있다. 프랑스에서는 2017년 TramFret라는 방안을 제안하고 낡은 전차를 개조하여 화물을 운반하는 테스트를 수행하였으며(Le TRAMFRET, 2018), 프랑스 Monoprix사도 효율적인 공급망 확보와 교통체증을 줄이기 위해 철도를 화물 운송 수단으로 사용하려는 계획을 제시하였다(Delaitre and Barbeyrac, 2012). 일본의 경우 지하철 인프라와 차량을 개량하지 않고 이동형 캐리어를 활용하여 화물 운송에 대한 테스트를 수행하여 소비자 및 승객에게 긍정적 반응을 도출하였다(Kikuta et al., 2012). 이외에도 도심 친 환경 화물 운송 수단을 개발하고자 하는 다양한 노력 등이 수행되고 있다.

국내에서는 정부차원에서 물류산업의 성장과 대기 환경 등의 다양한 사회적 문제를 해결하기 위한 정책으로 도시철도를 활용한 생활 물류 서비스 구축을 위한 연구개발을 수행하고 있다(Rho et al., 2021). Chae et al. (2023)은 해당 도시철도를 활용한 생활물류 서비스 구축을 위한 연구개발을 위하여 도시물류 시스템 운영 시나리오를 개발하였다. 도시물류 시스템 운영 시나리오는 화물 운송과 회수 운송 운영 시나리오를 구분하고 차량기지물류공간, 화물열차, 화물역사 더미 플랫폼, 화물역사물류공간으로 공간을 분류하여 작성되었다. 이 운영 시나리오는 화물 운송 시간 순서에 따라 각 과정에서 필요한 동작과 정보 입출력의 과정이 화물 작업자(Freight worker), 수평이송장치(AGVs, Automated Guided Vehicles), 수직이송장치(VTS, Vertical Transfer Systems), 운영 시스템, 관제 시스템, 화물 승무원, 기관사 관점에서 작성되어 있다. 해당 연구에서는 수평이송장치, 수직이송장치 등 각 객체에서 예상되는 소요 시간을 계산하여 예상 소요 시간이 높은 구간을 추출하였다. 또한 예상 정차 시간을 도출하며 화물열차 도입을 위해 각 시스템 객체에 초점을 맞춘 연구가 진행되었다. 하지만 해당 연구에서는 새로운 시스템을 구축할 때 필수적으로 고려되어야 하는 유해위험요인을 파악하는 것이 포함되

어 있지 않다. 물류 시스템에는 택배물량의 급증으로 고강도 노동, 장시간 운행으로 종사자의 안전사고가 빈번하여 현장 안전성 확보가 매우 중요하고, 다양한 기계장치와 지게차 등의 이송장비, 많은 인력과 높이 적재된 화물 등 복잡한 물류센터 내 구조와 소음으로 인해 충돌, 끼임, 업무상 질병 등 산업재해 꾸준히 발생하는 산업이다.

새로운 시스템을 구축할 때에는 새로운 시스템에 따른 유해위험요인을 사전에 검토하고 이를 시스템 관점에서 예방하기 위한 계획이 사전에 수립되는 것이 중요하다. 따라서 본 연구의 목적은 사전에 개발된 도시물류 시스템 운영 시나리오 분석을 통하여 시스템 운영 중 발생할 수 있는 유해위험요인을 도출하는 것이다. 이후 도출한 유해위험요인을 4M 위험성 평가, 평가항목 분석을 분류하고 빈도분석을 수행하여 예방이 필요한 시스템을 제안하고자 한다.

2. Method

2.1 Hazardous risk factor classification and 4M evaluation

본 연구는 유해위험요인을 분류한 16가지는 KOSHA-GUIDE G-83-2016 산업재해 기록·분류에 관한 지침(KOSHA, 2016)에서 사업장 내 발생하는 재해 발생 형태에 따른 분류 체계와 고용노동부 산업재해발생기록부 작성 안내서(Ministry of Employment and Labor, 2007)를 참조하여 도시철도 물류 시스템 운영 시나리오를 검토하였다. 각 단계에서 발생할 수 있는 문제를 가정하고 5인의 전문가가 브레인스토밍을 통해 유해위험요인을 분류하였다. 전문가 집단은 산업공학, 안전공학 및 인간공학을 전공으로 한 박사 4인과 석사 1인으로 구성되었으며, 해당 전문가 집단은 학계와 연구원에서 근무하고 있다. 해당 전문가 집단은 산업공학, 안전공학 및 인간공학 관련 분야에서 평균 10년 이상의 연구 경력을 갖는 자들로 구성되었다. 브레인스토밍에 앞서 1) 5인의 연구자가 앞서 참고한 지침과 안내서를 통해 도출한 분류 체계를 기반으로 상황별 아이디어를 각각 작성하였다. 해당 작성된 내용을 기반으로 2) 5인의 연구자가 화상회의를 통하여 도출된 상황별 아이디어를 기반으로 의견을 공유하고 중복되거나 확장할 내용을 취합해 반영하였다. 3) 해당 취합된 내용을 기반으로 3차례의 화상회의를 통하여 시나리오별 발생할 수 있는 유해위험요인을 최종적으로 정리하였다.

또한 한국산업안전공단 4M 위험성 평가 절차 및 방법에서 4M의 항목별 유해위험요인(예시) 자료를 참고하여 유해·위험 상황에서 인적(Man), 기계적(Machine), 물질·환경적(Media), 관리적(Management) 4M 유형을 체크하였다(KOSHA, 2007). 인적(Man) 측면에서는 노동자의 무지나 부주의로 인한 실수, 교육 및 훈련 부족으로 인한 안전규정 위반, 그리고 노동자의 피로나 스트레스로 인한 운전 오류 또는 조작 오류 등이 고려되었다. 기계적(Machine) 요소에서는 기계의 설계 결함으로 인한 작동 오류, 유지보수 미흡으로 인한 기계 고장, 그리고 자동화 장비의 제어 시스템 결함으로 인한 사고 등이 주요 요인으로 작용할 수 있다. 물질·환경적(Media) 측면에서는 유해 물질의 누출 또는 산업 폐기물 처리 불량으로 인한 오염, 화학물질의 취급 부주의로 인한 산업 안전사고, 그리고 환경 조건(예: 온도, 습도)의 변화로 인한 작업 환경의 위험성 등이 고려되었다. 마지막으로 관리적(Management) 측면에서는 안전 규정 미준수로 인한 사고 발생, 위험 평가 및 관리 체계의 부재 또는 미흡, 그리고 안전 인프라의 미비로 인한 사고 예방 방안 부재 등이 주요 요인으로 고려되었다.

각 상황에서 필요한 평가항목을 위험성, 작업부하, 휴먼에러로 분류하였다. 위험성(Risk) 평가는 각 상황에서의 위험요인을 식별하고 그에 따른 위험의 정도를 평가하는 것이다. 이는 인적(Man), 기계적(Machine), 물질·환경적(Media), 관리적(Management) 유형에 해당하는 위험성을 분석하는 것을 의미한다. 작업부하(Workload) 평가는 작업부하는 작업자가 수행하는 작업의 복잡성 및 양을 평가한다. 이는 작업의 규모, 기간, 작업 환경 등을 고려하여 작업부하를 평가하고, 부하가 너무 높거나 낮을 때 발생할 수 있는 위험을 고려한다. 휴먼에러(Human Error) 평가는 작업자의 인적 요소에 의한 실수나 부주의로 인한 오류를 평가한다. 이는 작업자의 지식, 기술, 경험, 피로도, 스트레스 등을 고려하여 작업자의 실수 가능성과 그에 따른 위험을 분석했다.

유해위험요인, 4M 유형, 평가항목을 각각 분류한 시나리오 분석 결과는 차량기지물류공간, 화물열차, 화물역사 더미 플랫폼, 화물역 사물류공간으로 총 4개 공간에 따라 분류하여 아래 Table 1과 같이 정리하였다.

Table 1. List of hazardous and risk factors in vehicle base logistics area and derivation of evaluation criteria and 4M based on hazardous factors

Process	Step	Task content	Hazardous factors	Hazardous content	Evaluation criteria*			4M**			
					R	W	H	M ¹	M ²	M ³	M ⁴
Freight loading scenario	1	Confirm the freight classified according to the destination information (arrival freight station).	Explosion · Rupture	Explosion due to chemical substances inside freight	Y	N	N	N	N	N	Y
			Fire	Fire occurrence due to hazardous freight	Y	N	N	N	N	N	Y
AGVs loading scenario	54	(AGVs) Move to the waiting QR position for boarding the freight train along the designated route.	Crush · Pinch	Issues due to objects falling during AGVs and standard container movement	N	N	N	N	N	Y	N
			Struck by object	Objects collapsing while moving to the standby position	N	N	N	N	N	Y	N
Total					20	5	20	29	15	45	18

*R: Risk assessment, W: Workload, H: Human Error
 **M¹: Man, M²: Machine, M³: Media, M⁴: Management

공간별 시나리오 분석 결과의 특징(Table 2)을 살펴보면, 차량기지물류공간은 화물 작업자가 표준용기에 화물을 적재하고 수평이송장치를 통해 화물열차로 이송하는 공간이다. 차량기지물류공간은 화물 작업자의 근골격계 부하 발생과 수평이송장치와 작업자 간 상호작용이 발생할 수 있다. 화물열차공간은 다수의 표준용기와 수평이송장치를 승강장으로 이동시키기 위한 공간으로, 수평이송장치 탑승, 육안확인에서 위험요인이 발생할 수 있으며, 출입문 작동과 연관된 문제가 노출될 수 있다는 점이 다른 공간과 차이점으로 조사되었다. 화물역사 더미 플랫폼은 화물 작업자 없이 수평이송장치, 수직이송장치의 동작과 통합 클라우드 서버와의 송수신이 이루어지는 작업공간이다. 수평이송장치, 수직이송장치의 움직임으로 인한 유해위험요인이 발생할 것으로 예상되어 이동장치에 대한 주의가 필요하다. 화물역사물류공간은 수직, 수평이송장치로 이송해 온 표준용기 내 화물을 화물 작업자가 하차시키는 작업을 하는 공간이다. 이 공간에서는 이송장치에 의한 사고와 표준용기 내 화물을 하역하는 작업에서 사고가 발생할 것으로 예상했다.

Table 2. Characteristics by space

Space	Characteristics
Vehicle base logistics area	A space where freight workers load freight into standard containers and transport the standard containers to freight trains via AGVs*. Musculoskeletal load on freight workers and interactions between AGVs* and workers are expected.
Freight train	A space for moving multiple standard containers and AGVs* to the platform. Hazardous risk factors are anticipated to arise during the visual inspection process and boarding of AGVs*, and issues related to the opening and closing of access doors may occur.

Table 2. Characteristics by space (Continued)

Space	Characteristics
Freight terminal stack platform	A space where AGVs* and VTS** operate and communicate with an integrated cloud server without the presence of freight workers. Issues are expected to arise due to the movements of the AGVs* and VTS**.
Freight terminal logistics area	A space where freight workers unload freight from standard containers transported by AGVs* and VTS**. Accidents are anticipated due to mishaps involving the transfer equipment and during the unloading of freight from inside the standard containers.

*AGVs: Automated Guided Vehicles

**VTS : Vertical Transfer System

2.2 Frequency analysis

본 연구는 도시물류 시스템 운영 시나리오를 검토하여 시스템이 구동하면서 발생할 수 있는 위험유해요인과 위험 내용을 정의하고, 유해·위험 상황에서 4M과 평가 항목을 분류한 결과를 토대로 빈도분석을 진행했다. 빈도분석은 공간에 따른 유해위험요인, 공정에 따른 유해위험요인, 평가항목에 따른 유해위험요인, 공간에 따른 4M, 공정에 따른 4M, 공간에 따른 평가항목, 공정에 따른 평가항목을 수행했다. 이러한 빈도분석을 통해 각각의 요인이나 항목이 발생하는 빈도와 그에 따른 위험의 정도를 평가하고, 도시물류 시스템 운영에서 발생할 수 있는 주요 위험을 식별하고 대응 방안을 마련하는 데 적용했다.

3. Results

3.1 Hazardous risk factor depending on space

Table 3은 공간에 따른 유해위험요인을 빈도로 정리한 결과이다. 상위 20%에 해당하는 유해요인은 빈도 6건 이상에 해당된다. 차량 기지물류공간에서는 가장 다양하고 많은 위험요인이 발생하며 넘어짐, 깔림·뒤집힘, 끼임, 물체에 맞음이 높은 빈도로 발생할 것으로 예상했다. 다음으로 화물열차공간에서 끼임, 부딪힘 사고가 많이 발생할 수 있을 것으로 도출했다. 화물역사물류공간에서는 깔림·뒤집힘이 가장 빈번하게 발생할 것으로 예상된다. 화물역사 더미 플랫폼은 14건으로 가장 적은 수의 유해위험요인이 있었다. 시나리오상 절차가 가장 적고 시나리오상 화물 작업자의 개입이 없는 점이 분석 결과에 영향을 주었을 것으로 예상된다.

Table 3. Analysis of hazardous risk factors based on space

Space \ Hazardous factors	Vehicle base logistics area	Freight terminal stack platform	Freight terminal logistics area	Freight train	Total
Electric shock				4	4
Musculoskeletal disorders	5		4	3	12
Other	1	3		3	7
Crush · Pinch	6	3	6	4	19
Entrapment	6	2	4	7	19
Toppling / Tipping over	7		4	4	15

Table 3. Analysis of hazardous risk factors based on apace (Continued)

Hazardous factors	Space				
	Vehicle base logistics area	Freight terminal stack platform	Freight terminal logistics area	Freight train	Total
Falling	1			2	3
Collapse	2		2		4
Struck by object	6		5	2	13
Impact	4	3	3	7	17
Workplace traffic accidents	4	3	2	3	12
Occupational diseases	2				2
Cutting · Slicing · Piercing	2				2
Explosion · Rupture	5				5
Fire	5				5
Chemical Spill · Leakage	5				5
Total	61	14	30	39	144

3.2 Hazardous risk factor depending on process

Table 4에서 보는 바와 같이, 공정에 따른 유해위험요인에서 상위 20% 항목은 3건 이상의 빈도를 갖는다. 수평이송장치/화물운송 표준용기 체결 시나리오 공정에서 가장 많은 유해위험요인이 있을 것으로 예상된다. 특히 끼임, 넘어짐, 근골격계질환, 물체에 맞음의 상위 유해요인으로 분류된다. 다음으로 많은 유해요인이 예상되는 공정은 수평이송장치 상차 시나리오이며 끼임, 부딪힘, 사업장 내 교통사고가 총 3건씩 있었다. 화물운송 표준용기 결박 시나리오 공정에서는 깔림·뒤집힘이 예상되었다.

Table 4. Analysis of hazardous risk factors based on process

Hazardous factors	VTS		AGVs			AGVs/Freight transportation		Freight				Total
	Boarding	Operation	Grouping	Loading	Getting off	SC ⁺ connection	SC ⁺ connection release	Transportation monitoring	Transportation SC ⁺ restraint	Loading	Handling	
Electric shock	1			1	1				1			4
Musculoskeletal disorders	1					3	1		2	2	3	12
Other	1	1	1		1			2	1			7
Crush · Pinch	1	2	1	2	1	3	2		3	1	3	19
Entrapment	1	1	1	3	2	4	1		2	1	3	19
Toppling / Tipping over			1	2	1	4	1		1	2	3	15
Falling				1	1	1						3

Table 4. Analysis of hazardous risk factors based on process (Continued)

Process Hazardous factors	VTS		AGVs			AGVs/Freight transportation		Freight				Total
	Boarding	Operation	Grouping	Loading	Getting off	SC* connection	SC* connection release	Transportation monitoring	Transportation SC* restraint	Loading	Handling	
Collapse	1					1				1	1	4
Struck by object			1	2		3	2		1	1	3	13
Impact	1	2	1	3	2	2	1		2	1	2	17
Workplace traffic accidents		2	2	3	1	1	1	1			1	12
Occupational diseases										2		2
Cutting · Slicing · Piercing						2						2
Explosion · Rupture						2				3		5
Fire						2				3		5
Chemical Spill · Leakage						2				3		5
Total	7	8	8	17	10	30	9	3	13	20	19	144

*SC: Standard Container

3.3 Classification of evaluation method according to hazardous risk factor

Table 5는 유해위험요인에 따라 분류한 평가방법을 보여준다. 위험성, 작업부하, 휴먼에러 중에서는 휴먼에러 평가방법을 적용할 수 있는 위험 요인이 가장 많았으며 사업장 내 교통사고, 넘어짐, 끼임, 부딪힘이 상위 유해위험요인으로 나타났다. 휴먼에러 평가방법을 적용할 위험요인이 전체 위험요인의 절반 이상을 차지하는 것으로 보아, 휴먼에러로 인한 사고를 예방할 방법을 찾아보는 것이 필요할 것으로 보인다. 위험성 평가와 관련된 유해위험요인은 여러 위험요인에 고루 분포하였다. 근골격계질환이 예상되는 위험요인은 작업부하 평가방법을 적용하는 것에 집중되어 있다.

Table 5. Analysis of evaluation method based on hazardous factors

Hazardous factors	Evaluation method	Risk assessment	Workload	Human error	Total
Electric shock		4			4
Musculoskeletal disorders			12	1	13
Other					0
Crush · Pinch		1			1
Entrapment				8	8
Toppling / Tipping over		1		10	11

Table 5. Analysis of evaluation method based on hazardous factors (Continued)

Hazardous factors	Evaluation method	Risk assessment	Workload	Human error	Total
Falling				2	2
Collapse		1			1
Struck by object				3	3
Impact		1		8	9
Workplace traffic accidents				11	11
Occupational diseases		1			1
Cutting · Slicing · Piercing				2	2
Explosion · Rupture		5		2	7
Fire		5		3	8
Chemical Spill · Leakage		5		2	7
Total		24	12	52	88

3.4 Classification according to 4M method

Table 6는 공간에 따라 4M의 분포를 분석한 자료이다. Table 6에서는 차량기지물류공간에서 사람과 물질환경에 의한 사고 발생 가능성이 가장 높은 것으로 나타났다. 화물열차에서는 사람에 의한 사고가 가장 높은 빈도로 나타났다. 전체 공간에서 4M의 분포를 보면 환경, 인력, 기계, 관리 순으로 높게 나타났다.

Table 6. Analysis of 4M based on space

Space	4M	Man	Machine	Media	Management	Total
Vehicle base logistics area		29	15	45	18	107
Freight terminal stack platform		7	4	9	5	25
Freight terminal logistics area		13	6	21	3	43
Freight train		31	15	21	6	73
Total		80	40	96	32	248

Table 7은 공정에 따라 4M 유형을 분석했다. 공정 시나리오 중에는 수평이송장치/화물운송 표준용기 체결 시나리오에서 가장 많은 사고 발생이 예상되며 4M 유형에서는 환경과 인적 부분에서 높은 빈도로 나타났다.

Table 7. Analysis of 4M based on process

Process	4M	Man	Machine	Media	Management	Total
VTS boarding scenario		4	3	4	1	12

Table 7. Analysis of 4M based on process (Continued)

Process \ 4M	Man	Machine	Media	Management	Total
VTS operation scenario	4	2	5	3	14
AGVs grouping scenario	2	6	6	1	15
AGVs loading scenario	10	9	9	4	32
AGVs getting off scenario	8	3	6	1	18
AGVs / Freight transportation standard container connection scenario	15	8	25	9	57
AGVs / Freight transportation standard container connection release scenario	2	2	7	1	12
Freight transportation monitoring scenario	3		1	1	5
Freight transportation standard container restraint scenario	9	4	10	1	24
Freight loading scenario	12		11	8	31
Freight handling scenario	11	3	12	2	28
Total	80	40	96	32	248

3.5 Classification of risk assessment, workload, and human error

Table 8은 공간에 따른 평가항목을 보여준다. Table 8은 빈도분석 결과에서는 차량기지물류공간에서 위험성 평가와 휴먼에러 평가항목에 해당하는 유해위험요인의 발생 빈도가 높은 것으로 나타났다.

Table 8. Analysis of evaluation criteria based on space

Space \ Evaluation criteria	Risk assessment	Workload	Human error	Total
Vehicle base logistics area	20	5	20	45
Freight terminal stack platform	0	0	8	8
Freight terminal logistics area	0	4	9	13
Freight train	4	3	15	22
Total	24	12	52	88

Table 9은 공정에 따른 평가항목에 대해 분석한 결과이다. 분석 결과는 화물적재 시나리오 상에서 유해요인 발생 빈도가 가장 높으며 위험성 평가를 적용할 요소가 많은 것으로 나타났다. 다음은 수평이송장치/화물운송 표준용기 체결 시나리오 상에서 많은 유해요인이 발생하는 것으로 나타났으며, 휴먼에러 평가방법을 적용할 요인이 많은 것으로 보인다. 평가방법 측면에서 보면 위험성, 작업부하, 휴먼에러 중 휴먼에러 평가방법을 적용할 수 있는 유해요인이 많은 것으로 정리된다.

Table 9. Analysis of evaluation criteria based on process

Process \ Evaluation criteria	Risk assessment	Workload	Human error	Total
VTS boarding scenario	1	1	1	3
VTS operation scenario			5	5
AGVs grouping scenario			2	2
AGVs loading scenario	1		9	10
AGVs getting off scenario	1		5	6
AGVs / Freight transportation standard container connection scenario	6	3	10	19
AGVs / Freight transportation standard container connection release scenario		1	2	3
Freight transportation monitoring scenario			1	1
Freight transportation standard container restraint scenario	1	2	3	6
Freight loading scenario	14	2	7	23
Freight handling scenario		3	7	10
Total	24	12	52	88

4. Discussion

본 연구는 지하물류 시스템을 새롭게 구축하는 데 앞서 필요한 유해요인, 4M, 휴먼에러 요소들에 대하여 가상 작업 시나리오들을 바탕으로 평가 체계를 개발했다. 또한 빈도분석을 수행해 잠재적으로 위험도가 높을 것으로 예상되는 주요 작업 시나리오들을 선별했다.

본 연구 결과에서 공간 및 공정에 대한 유해위험요인과 4M 분석의 상위 항목을 차지하는 것은 근골격계질환, 깔림·뒤집힘, 끼임, 넘어짐, 물체에 맞음, 부딪힘, 사업장 내 교통사고로 나타났다(Table 3, 4). 또한 유해위험요인 발생과 4M 분석으로 분류한 자료에 따르면 공간은 차량기지물류공간과 화물열차, 공정은 수평이송장치/화물운송 표준용기 체결 시나리오, 수평이송장치 상차 시나리오, 화물운송 표준용기 결박 시나리오, 화물적재 시나리오, 화물하역 시나리오가 상위 항목으로 분류되었다(Table 6, 7).

차량기지물류공간은 표준용기에 화물을 적재하고 AGVs가 그룹화하여 이동하는 과정을 포함하며, 표준용기에 화물을 적재하는 과정에서 화물 작업자의 직접적인 개입이 있을 것으로 보인다. 화물열차는 표준용기를 결합한 AGVs가 화물열차에 탑승하여 결박되는 과정이며 이 과정에서 사람은 물리적, 육안 확인을 하는 것으로 시나리오 기획되어 있다. 이 공간에서는 끼임 사고가 많이 발생할 것으로 예상했다. 위 두 공간에서는 화물열차의 문이 열고 닫히는 과정에서 끼임 사고가 많이 예상되었다. 또한, AGVs의 기계적 결함문제 외 작업자의 부주의 또는 동선 문제로 AGVs 이동 중 작업자와 충돌한 경우와 작업을 위해 AGVs로 접근 중 걸려 넘어지는 경우처럼 AGVs와 작업자 간 문제 발생이 야기되는 부분을 우선적으로 확인하여 개선하는 것이 필요할 것이다. 또한, AGVs와 작업자 사이에서 끼임 사고가 많이 발생하는 만큼 이중 고정장치 설계가 필요할 것으로 보인다. 물리적으로 개선사항 이외에도 작업 환경과 작업 순서, 장소 등을 점검하고, 작업자 안전교육이 필요하다. 또한, 휴먼에러로 인해 화학물질 누출접촉과 같이 표준용기에 적재된 제품의 종류에 따라 위험성이 존재할 수 있다. 위험성이 있는 제품을 취급할 때 가이드라인 확보가 필요할 것으로 보인다.

화물역사 더미 플랫폼은 표준용기를 결합한 AGVs가 화물열차에서 하차하여 QR 정보에 따라 VTS 탑승입구로 이동하며, 탑승하여 결박되고 목적지 층에 도착하는 과정이 이루어지는 공간이다. 이 공간에서 수행되는 공정 수는 타 공간에 비해 적은 편이며, 공정 내

용에 화물 작업자나 승무원, 기관사의 개입이 없기 때문에 가장 유해위험요인 부담이 적게 나타난 것으로 보인다.

화물역사물류공간은 VTS를 통해 이동한 표준용기를 결합한 AGVs가 VTS에서 결박이 해제되며, AGVs를 통해 표준용기 해체 위치로 이동하며 AGVs와 표준용기가 분리되는 공정이 이루어진다. 또한 표준용기 내 적재되어 있는 화물을 하역하는 과정을 포함하여, 화물 작업자의 직접적인 개입이 있는 공간에 해당된다. 이 공간에서는 AGVs와 표준용기가 결합 및 분리되는 과정에서 적재 물체나 표준용기가 충격으로 인해 발생할 깔림·뒤집힘을 주요 유해위험요인으로 보고 있다. AGVs와 표준용기의 결박 및 분리 기술의 발전과 AGVs의 제동 및 제어 기술의 발전이 필요하다.

근골격계질환은 도심 지하물류 시나리오에서 작업자의 움직임에 의한 직접적인 영향이 있는 유해위험요인이다. 해당 유해위험요인은 전체 공간 상에서도 상위 위험요인으로 분류되며 화물 적재와 하역 과정에서 발생할 것으로 나타났다(Table 4). 근골격계질환은 작업 부하 평가방법으로 평가할 수 있다. 작업 공간을 설계할 때, 물체 상하차 작업 시 필요 공간 계산과 작업공간 배치에 대한 시뮬레이션을 통해 근골격계질환을 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 또한 근골격계질환 문제의 많은 부분을 차지하는 공정은 체결 및 체결해제 부분을 물리적 또는 육안으로 확인하는 작업이다. 체결여부를 확인하는 과정에서 불편한 자세를 야기할 수 있기 때문이다. 향후에는 근로자가 체결을 확인하는 것이 아닌 센서와 카메라를 활용하여 이중으로 체크하는 시스템 도입이 필요하다.

본 연구의 제한점으로는 아직 현장에서 실질적인 검증을 해보지 못한 것에 있다. 지하물류 시스템은 현재 지역 곳곳에서 분산되어 개발이 진행 중이므로 개발 단계상 본 연구에서 제시한 모델에 실질적 검증은 수행할 수 없었다. 추후에 개발이 완료되면 제한한 평가 체계를 토대로 실제 현장에 적용해서 타당성 연구를 수행할 계획이다.

5. Conclusion

본 연구에서는 도심 지하물류 시나리오를 바탕으로 발생할 수 있는 다양한 유해위험요인을 도출하고, 이러한 위험요인들을 평가 및 분석하여 예방이 필요한 시스템을 제안했다. 이를 위해 4M(인간, 기계, 물질/환경, 관리) 위험성 평가 및 평가항목 분석을 통해 위험요인을 분류하고 빈도분석을 수행했다. 차량기지물류공간, 화물열차공간, 화물역사물류공간 등에서 발생할 수 있는 사고의 유형과 빈도를 예측하였다. 또한, 사고가 많이 발생하는 공간과 공정에 대해 수평이동장치와 표준용기에 이중 고정장치 설계, 끼임 방지 장치, 센서와 카메라를 활용한 이중 체크 시스템 도입 등 유해위험요인을 막기 위한 장치를 제안하였다. 본 연구에서는 지하물류 시스템을 구축할 시 인간과 환경/기계/기구/설비 사이에서 발생할 수 있는 문제를 사전에 예측하고 이를 시스템 관점에서 예방하기 위한 다양한 전략을 제시하였다는데 의의가 있다. 하지만 본 연구는 가상으로 수립된 도심 지하물류 시나리오를 대상으로 유해위험요인을 분석하였다는 단점이 있으므로, 추후 실증 연구를 통하여 해당 연구 결과를 검증하여야 할 필요가 있다. 본 연구를 바탕으로 도심 지하물류산업에 안전성 고려한 실질적인 시스템 개발 및 운영에 도움을 줄 수 있으며, 도시물류 시스템의 효율적인 구축에 기여할 것으로 기대한다.

Acknowledgement

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant RS-2021-KA163194).

References

- Campisi, T., Russo, A., Bouhouras, E., Tesoriere, G. and Basbas, S., The Increase in E-commerce Purchases and the Impact on the Newest European City Logistics Development. *The Open Transportation Journal*, 17(1), 2023.
- Chae, U., Hwang, J., Lee, J., Jang, K. and Kim, J.U., Development of EFFBD-based model for urban logistics system operation scenario verification. *Journal of Logistics Science and Technology*, 4(1), 19-40, 2023.

Kikuta, J., Ito, T., Tomiyama, I., Yamamoto, S. and Yamada, T., New subway-integrated city logistics system, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 39, 476-489, 2012.

Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA). *Guidelines for recording and classifying industrial accidents (KOSHA Guide G-83-2016)*. 2016.

Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA). *4M risk assessment procedures and methods (G-S-W04-02)*. 2007.

Le TRAMFRET: vers une logistique urbaine durable, 2018.

Delaitre, L. and Barbeyrac, C.D., Improving and urban distribution centre, the French case of Samada Monoprix, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 39, 753-769, 2012.

Ministry of Employment and Labor. *Guide to creating an industrial accident record*. 2007.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Ministry of Oceans and Fisheries., *National Logistics Basic Plan (2016-2025)*. 2016.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport., *Future smart convergence logistics technology development project planning final report*, 2020.

Moon, S.W., Lee, H.B., Shin, S.J. and Kim, D.H., A study on the underground logistics system for the advancement of the future logistics environment. *The Journal of the Korea Contents Association*, 21(12), 375-383, 2021.

Rho, H.S., Lee, T.H. and Kang, H., Utilization of subway stations for drone logistics delivery in the post-pandemic Era. Korea Transport Institute. RR-21-14, 2021.

Rajamanickam, M., Royan, E.N.J.G., Ramaswamy, G., Rajendran, M. and Vadivelu, V., Fourth Industrial Revolution: Industry 4.0. *Integration of Mechanical and Manufacturing Engineering with IoT: A Digital Transformation*, 41-84, 2023.

Song, Y.A. and Lee, J.H., Global Growth Strategy of SMEs in the Era of the Fourth Industrial Revolution: Perspectives from Leadership and Network Theory. *The e-Business Studies*, 24(5), 291-305, 2023.

Tutino, J. and Melosi, M.V. (Eds.), *New World Cities: Challenges of Urbanization and Globalization in the Americas*. UNC Press Books. 2019.

Author listings

Jiyeon Ha: jiyeon4413@gmail.com

Highest degree: MS, Department of Industrial Engineering, Ajou University

Position title: Researcher, Division of Energy Resources Engineering and Industrial Engineering, Kangwon National University

Areas of interest: Ergonomics, Biomechanics, Usability Test, UI/UX

Uri Chae: chaeuri@krii.re.kr

Highest degree: Ph.D, Department of Industrial Engineering, Ajou University

Position title: Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute

Areas of interest: Usability Test, User Experience, Operational Scenario, Scenario Development

Jinwon Lee: jwlee@gwnu.ac.kr

Highest degree: Ph.D, Department of Industrial Engineering, Ajou University

Position title: Assistant Professor, Department of Industrial & Management Engineering, Gangneung-Wonju National University

Areas of interest: Artificial Intelligence, Digital Manufacturing, Deep learning

Jaejin Hwang: jhwang3@niu.edu

Highest degree: Ph.D, Department of Industrial and Systems Engineering, Ohio State University

Position title: Associate Professor, Department of Industrial and Systems Engineering, Northern Illinois University

Areas of interest: Ergonomics, Biomechanics, Neuroergonomics

Kyung-Sun Lee: ksunlee@kangwon.ac.kr

Highest degree: Ph.D, Department of Industrial Engineering, Ajou University

Position title: Associate Professor, Division of Energy Resources Engineering and Industrial Engineering, Kangwon National University

Areas of interest: Ergonomics, System safety, Biomechanics, WMSDs, Work analysis and design, UI/UX