

재해분석과 실태조사를 통한 스마트 팩토리 공정의 위험성 감소 방안

변정환*

Plan for Risk Reduction of Smart Factory Process through Accident Analysis and Status Survey

Junghwan Byeon*

Corresponding Author

Junghwan Byeon
Tel : +82-52-703-0843
E-mail : bjh6918@kosha.or.kr

Received : August 31, 2022
Revised : September 30, 2022
Accepted : October 5, 2022

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

Abstract : The domestic smart factory is being built and spread rapidly, mainly by mid-sized companies and large enterprises according to the government's active introduction and support policy. But these factories only promote production system and efficiency, so harmfulness and risk factors are not considered. Therefore, to derive harmful risk factors in terms of industrial safety for 12,983 government-supported smart factory workplaces from 2014 to 2019, industrial accident status analysis compared workplaces with automation facilities and government-supported workplaces with automation facilities. Also, to reduce risks associated with domestic smart factory processes, twenty government-supported workplaces with automation facilities underwent analysis, evaluating risks through a status survey using the process evaluation table. In addition, the status survey considered region, size, industry, construction level, and accident rate; the difference in risk according to the structure of the process was confirmed. Based on the smart factory process evaluation results, statistical analysis confirmed that serial, parallel, and hybrid structures pose different risk levels and that the risks of mixed structures are greater. Finally, safety control system application was presented for risk assessment and reduction in the smart factory process, reflecting the results of disaster analysis and actual condition investigation.

Key Words : smart factory, accident analysis, status survey, risk reduction, safety control system

1. 서론

최근 정부는 스마트 팩토리 저변 확대를 기반으로 양적보급 중심에서 고도화 방향으로 전환하고자 2020년부터는 「스마트제조 2.0 전략」 및 「스마트 제조혁신 실행 전략」을 추진하고 있다¹⁾. 또한, 전 세계 스마트 팩토리 시장 규모가 2019년부터 2024년까지는 연평균 성장률이 9.8%로 빠르게 성장할 것으로 예상 된다^{2,4)}. 그리고 국내 스마트 팩토리 시장 규모도 2019년부터 2024년까지는 연평균 성장률이 11.4%로 2024년에는 약 152.8억 달러로 세계시장과 비교하여 빠른 속도로 성장할 것으로 예상 된다^{2,4)}.

더불어 스마트 팩토리 관련 국내·외 연구도 제4차

산업혁명, 스마트 공장의 도입, 보급 및 확산 그리고 성과분석 등의 관점에서 다양하게 수행되고 있다.

또한 현대사회는 대형화, 복잡화, 집적화 및 고도화 등으로 인한 객관적 위험의 증가로 이미 위험사회로 진입하였으며, 이제는 더 이상 위험을 단순하게 제거하는 것이 아닌 객관적 위험을 감수해야만 하는 사회로 변화되고 있다^{5,6,7)}. 즉, 우리 사회는 이러한 위험을 안전한 수준으로 관리하도록 권장하는 사회로, 이제는 우리 사회의 위험을 구조적 특성에 기인하는 특수한 문제로 인식함으로써 배척 대상으로 간주하기보다는 일상적인 문제로 인식하고 수용 가능한 안전한 관리대상으로 고려해야 할 시점이다.

그러나 스마트 팩토리 관련 안전보전에 관한 국내·

의 연구는 안전시스템 평가 또는 안전성 확보 관점에서 일부 수행되었으나, 스마트 팩토리의 전반적인 안전보건 실태, 사회적 이슈 및 문제점 등에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다^{8,9)}. 무엇보다도 국내 스마트 팩토리 추진 방향이 생산체제와 효율성 중심으로만 추진되고 있어 스마트 팩토리 관련 유해·위험요인 예측과 위험성 대응에 대한 고려가 되지 않고 있다.

다만, 스마트 팩토리 공정 특성상 대형화, 복잡화, 집적화 및 고도화 등으로 인해 상당한 객관적 위험이 구조적으로 내포되어 있어 기존의 위험성 제거 및 감소 방식으로는 더 이상 안전수준을 향상하기 어렵다. 따라서 제조 기계·설비의 자동화 및 공장의 스마트화로 발생할 수 있는 새로운 위험성에 대응하고 실효성 있는 안전보건대책을 제시할 수 있는 방안이 필요하다.

이에 본 논문에서는 정부지원 스마트 팩토리 사업장의 산업재해 현황 비교 분석 및 실태조사를 통하여 스마트 팩토리 공정의 새로운 유해·위험요인을 도출·구분 하고자 한다. 그리고 도출·구분 결과를 토대로 해당 위험성에 대응하는 감소 방안을 제시함으로써 국내 스마트 팩토리 공정의 안전성 확보를 통하여 산업재해예방 및 생산성 향상에 기여하고자 한다.

2. 스마트 팩토리 사업장 산업재해 현황 분석

2.1 스마트 팩토리 도입 현황

정부지원 스마트 팩토리 사업장은 2014년부터 2020년까지 19,799개소로 Fig. 1과 같이 매년 지속적으로 성장하고 있으며, 2018년부터는 급격한 성장세를 보이고 있다. 또한, 정부도 그동안의 스마트 팩토리 구축 성과를 바탕으로 양적 보급 중심에서 질적 고도화 방향으로 전환을 위하여 올해까지 3만 개소 보급을 목표로 다양한 정책을 추진해오고 있다¹⁰⁾.

그리고 2014년부터 2020년까지 정부지원 스마트 팩토리 사업장의 수준별 도입 현황은 Fig. 2와 같다¹¹⁾.

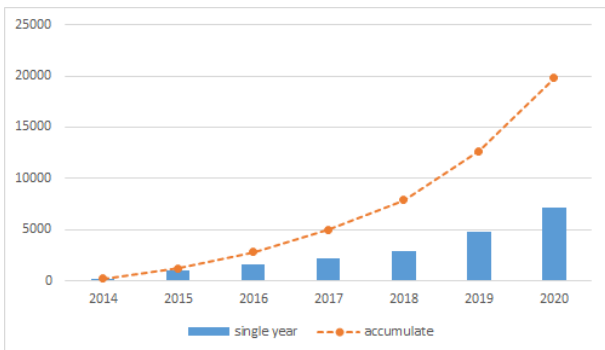


Fig. 1. The adoption status of smart factory by year.

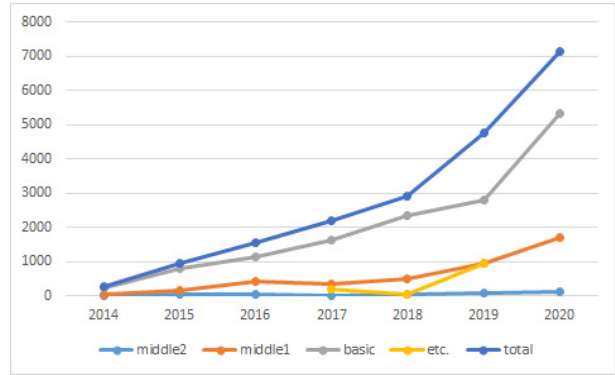


Fig. 2. The adoption status of smart factory by level.

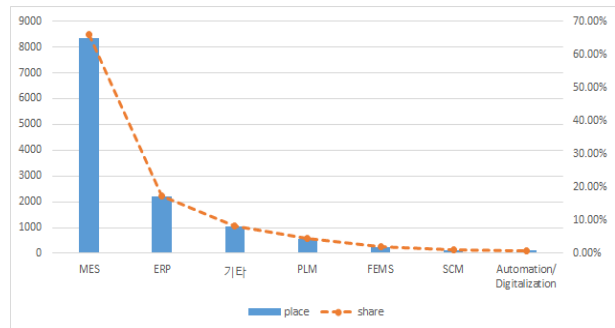


Fig. 3. The adoption status of smart factory by solution.

최근 7년간 수준별 누적실적은 Level 1, Level 2를 포함한 기초 단계가 72.0%, 중간1 단계가 20.5%, 중간2 단계가 1.6%로, 2020년까지의 누적 고도화율은 22.1%이다.

또한 2014년부터 2019년까지 정부지원 스마트 팩토리 사업장의 솔루션별 도입 현황은 Fig. 3과 같다¹¹⁾. MES(제조실행 시스템) 도입 사업장이 66.0%, ERP(전사적 자원 관리) 도입 사업장이 17.3%를 차지하고 있다. 정부지원 사업장에서는 경영활동 과정을 통합·관리하는 경영정보 시스템이 대부분을 차지하고 있다.

기타 현황으로는 2020년 기준 정부지원 스마트 팩토리 사업장의 지역(행정구역)별 분포는 경기도가 제일 많으며, 경상권에서는 전체 대비 35.8%의 비중을 차지하고 있다¹²⁾.

그리고 2022년 기준 정부지원 스마트 팩토리 사업장의 규모별 분포는 50인 미만 사업장 비율이 68.6%, 50인 이상 300인 미만 사업장 비율이 29.8%로 중·소 규모 사업장이 다수를 차지하고 있다. 또한 업종별 분포는 제조업이 93.9%를 차지하고 있으며, 기계기구·금속·비금속광물제품제조업, 전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업, 화학및고무제품제조업 등 3개 업종이 제조업에서 82.73%를 차지하고 있다.

2.2 스마트 팩토리 사업장의 산업재해 현황^{13,14)}

2014년부터 2019년까지 정부지원 스마트 팩토리 사업장 12,983개소의 산업재해 현황을 분석하고 스마트 팩토리 공정의 위험성 감소 방안 수립에 활용하였다.

다만 국내 스마트 팩토리 사업장의 구축 수준 및 솔루션 등의 고도화, 자동화 또는 디지털화의 점유율이 낮기 때문에 산업안전 측면의 유해·위험요인에 대한 차별성을 도출하기 위해 정부지원 스마트 팩토리 사업장의 최근 3년간(2018년~2020년) 산업재해 발생현황을 Table 1 및 2에 나타내었다. 정부지원 스마트 팩토리 사업장(A), 자동화설비(산업용 로봇, 컨베이어 등) 보유 사업장(B) 그리고 자동화설비를 보유한 정부지원 스마트 팩토리 사업장(C)을 규모별, 업종별로 각각 비교·분석하였다.

2.3 현황분석

2014년부터 2019년까지 정부지원 스마트 팩토리 사업장의 재해율 현황은 규모별 비교에서는 5인 미만 사업장의 경우 제조업 평균, 자동화설비 보유 또는 자동

화설비 보유 정부지원 사업장의 규모별 평균보다는 높았다. 5인 이상 사업장에서는 전반적으로 규모가 커질수록 정부지원 사업장의 재해율이 자동화설비 보유 사업장과 제조업 평균 재해율보다는 낮았으나 자동화설비를 보유한 정부지원 스마트 팩토리 사업장보다는 높았다.

그리고 업종별 재해율 비교에서는 자동화설비 보유 사업장과 자동화설비 보유 정부지원 스마트 팩토리 사업장보다 정부지원 스마트 팩토리 사업장의 식료품제조업이 2.14배 및 2.64배, 섬유및섬유제품제조업이 1.56배 및 1.2배, 목재및종이제품제조업이 1.07배 및 3.09배, 의약품·화장품·연탄·석유제품제조업이 1.6배 및 1.28배 각각 높았다. 그리고 출판·인쇄·제본또는인쇄가공업은 자동화설비 보유 사업장보다 2.1배 높았다. 특히, 식료품제조업의 재해율이 1.03%로 해당 업종 평균 재해율 0.89%보다 1.16배 높았다.

또한 업무상사고 사망만인율 현황은 규모별 비교에서는 15인 이하의 소규모 정부지원 스마트 팩토리 사업장이 제조업 평균, 자동화설비 보유 또는 자동화설

Table 1. The comparison of occupational injury rate and fatal rate by worker scale of smart factory workplace

Worker Scale	Injury per 100 workers(Worker scale %)					Fatal per 10,000 workers(Worker scale %)						
	A	B	C	Total	Chi square (Significance probability)	Manufacturing industry average	A	B	C	Total	Chi square (Significance probability)	Manufacturing industry average
Average	0.45%	0.56%	0.53%	-	-	0.70%	0.32%	0.48%	0.22%	-	-	0.47%
Less than 5	1.85% (41.4)	1.12% (25.1)	1.50% (33.6)	4.47% (100)		1.50%	3.77% (25.4)	1.04% (7.0)	10.03% (67.6)	14.84% (100)		0.51%
5~9	1.02% (34.8)	0.66% (22.5)	1.25% (42.7)	2.93% (100)		1.02%	1.43% (73.3)	0.52% (26.7)	0.00% (0.0)	1.95% (100)		0.38%
10~15	0.91% (33.3)	0.61% (22.3)	1.21% (44.3)	2.73% (100)		0.86%	1.01% (67.3)	0.49% (32.7)	0.00% (0.0)	1.50% (100)		0.59%
16~29	0.72% (32.9)	0.56% (25.6)	0.91% (41.6)	2.19% (100)		0.72%	0.55% (28.9)	0.47% (24.7)	0.88% (46.3)	1.90 (100)		0.91%
30~49	0.59% (32.8)	0.47% (26.1)	0.74% (41.1)	1.80% (100)		0.60%	0.49% (30.4)	0.42% (26.1)	0.70% (43.5)	1.61 (100)		0.12%
50~99	0.45% (32.6)	0.39% (28.3)	0.54% (39.1)	1.38% (100)		0.47%	0.15% (20.3)	0.30% (40.5)	0.29% (39.2)	0.74% (100)		0.59%
100~199	0.36% (31.0)	0.34% (29.3)	0.46% (39.7)	1.16 (100)	0.519 (1.000)	0.42%	0.37% (31.9)	0.36% (31.0)	0.43% (37.1)	1.16 (100)	8.338 (0.996)	0.10%
200~299	0.31% (30.1)	0.29% (28.2)	0.43% (41.7)	1.03 (100)		0.37%	0.15% (23.1)	0.31% (47.7)	0.19% (46.3)	0.41% (100)		0.73%
300~499	0.30% (30.3)	0.31% (31.3)	0.38% (38.4)	0.99 (100)		0.33%	0.00% (0.0)	0.22% (53.7)	0.19% (46.3)	0.41% (100)		0.64%
500~999	0.32% (29.6)	0.32% (29.6)	0.44% (40.7)	1.08 (100)		0.31%	0.30% (60.0)	0.20% (40.0)	0.00% (0.0)	0.50% (100)		0.09%
1000~1999	0.34% (30.1)	0.19% (16.8)	0.60% (53.1)	1.13 (100)		0.44%	0.00% (0.0)	0.13% (100.0)	0.00% (0.0)	0.13% (100)		0.72%
over 2000	0.11% (11.5)	0.30% (31.3)	0.55% (57.3)	0.96 (100)		0.52%	0.00% (0.0)	0.09% (36.0)	0.16% (64.0)	0.25% (100)		0.76%
Total	7.28% (33.3)	5.56% (25.4)	9.01 (41.2)	21.85 (100)		-	8.22% (32.1)	4.55% (17.7)	12.87 (50.2)	25.64 (100)		-

Table 2. The comparison of occupational injury rate and fatal rate by industry of smart factory workplace

Industry	Injury per 100 workers(Industry %)					Chi square (Significance probability)	Industry average	Fatal per 10,000 workers(Industry %)					Chi square (Significance probability)	Industry average
	A	B	C	Total	A			B	C	Total				
All industry average	0.45%	0.56%	0.53%	-	-	-	0.56%	0.32%	0.48%	0.22%	-	-	-	0.47%
Manufacturing average	0.46%	0.53%	0.55%	-	-	-	0.70%	0.31%	0.28%	0.20%	-	-	-	0.51%
Food	1.03% (54.2)	0.48% (25.3)	0.39% (20.58)	1.90% (100)			0.89%	0.18% (30.5)	0.41% (69.5)	0.00% (0.0)	0.59% (100)			0.38%
Textile and textile product	0.58% (40.6)	0.37% (25.9)	0.48% (33.6)	1.43% (100)			0.58%	0.66% (100.0)	0.00% (0.0)	0.00% (0.0)	0.66% (100)			0.59%
Wood and paper products	0.68% (44.4)	0.63% (41.2)	0.22% (14.4)	1.53% (100)			1.32%	1.11% (71.2)	0.45% (28.8)	0.00% (0.0)	1.56% (100)			0.91%
Publishing, printing, bookbinding, or print processing	0.40% (67.8)	0.19% (32.2)	0.00% (0.0)	0.59% (100)			0.41%	0.43% (100.0)	0.00% (0.0)	0.00% (0.0)	0.43% (100)			0.12%
Chemical and rubber product	0.44% (23.4)	0.86% (45.7)	0.58% (30.9)	1.88% (100)			0.68%	0.52% (55.9)	0.41% (44.1)	0.00% (0.0)	0.93% (100)			0.59%
Pharmaceuticals, cosmetics, briquettes, and petroleum products	0.32% (41.6)	0.20% (26.0)	0.25% (32.5)	0.77% (100)		9.252 (0.980)	0.31%	0.22% (100.0)	0.00% (0.0)	0.00% (0.0)	0.22% (100)		11.648 (0.928)	0.10%
Machine tool, metal, non-metallic mineral product	0.57% (30.6)	0.65% (34.9)	0.64% (34.4)	1.86% (100)			0.91%	0.34% (43.0)	0.30% (38.0)	0.15% (19.0)	0.79% (100)			0.73%
Metal smelting	0.30% (48.4)	0.32% (51.6)	0.00% (0.0)	0.62% (100)			0.35%	0.00% (0.0)	0.75% (100.0)	0.00% (0.0)	0.75% (100)			0.64%
Electrical machine tool/precision machine/electronic product	0.20% (40.0)	0.08% (16.0)	0.22% (44.4)	0.62% (100)			0.18%	0.11% (11.6)	0.08% (8.4)	0.76% (80.0)	0.95% (100)			0.09%
Ship building and repair business	0.85% (21.3)	3.14% (78.7)	0.00% (0.0)	3.99% (100)			1.45%	0.00% (0.0)	0.69% (100)	0.00% (0.0)	0.69% (100)			0.72%
Handmade products and other products	0.49% (11.2)	0.49% (11.2)	3.41% (77.7%)	4.39% (100)			0.83%	0.00% (0.0)	1.83% (100.0)	0.00% (0.0)	1.83% (100)			0.76%
Total	5.86% (30.1)	7.41% (38.1)	6.19% (31.8)	19.46% (100)			-	3.57% (38.0)	4.92% (52.3)	0.91% (9.7)	9.4% (100)			-

비 보유 정부지원 스마트 팩토리 사업장의 규모별 평균보다는 높았다. 특히, 5인 미만 규모에서는 자동화설비를 보유한 정부지원 스마트 팩토리 사업장의 업무상 사고 사망만인율이 10.03%로 정부지원 스마트 팩토리 사업장 및 자동화설비 보유 정부지원 스마트 팩토리 사업장보다 각각 2.66배 및 9.64배 각각 높았다.

그리고 업종별 업무상사고 사망만인율 비교에서는 정부지원 스마트 팩토리 사업장의 섬유및섬유제품제조업, 출판·인쇄·제본및인쇄물가공업 및 의약품·화장품·연탄·석유제품제조업은 0.66%, 0.43% 및 0.31%이며 자동화설비 보유 및 자동화설비 보유 정부지원 사업장에서 사고사망은 발생하지 않았다. 목재및목재종이제품제조업은 자동화설비 보유 사업장보다는 2.46배 높았으며 자동화설비 보유 정부지원 사업장에서 사고사망은 발생하지 않았다. 전기기계기구·정밀기구·전자제품제조업은 자동화설비 보유 사업장보다는 1.37배 높았으나, 자동화설비를 보유한 정부지원 스마트 팩토리 사업장이 정부지원 스마트 팩토리 사업장보다는 6.9배 높았다.

2.4 통계분석

규모 및 업종에 따라 스마트 팩토리 정부지원 사업장, 자동화설비 사업장 및 자동화설비 보유 정부지원 사업장의 재해율과 사고사망만인율 분포가 다른지 알아보기 위해 SPSS 25 시스템을 활용하여 교차분석(카이제곱 검정)을 Table 1 및 2와 같이 실시하였다.

Table 1에서 “스마트 팩토리 정부지원 사업장, 자동화설비 사업장 및 자동화설비 보유 정부지원 사업장의 재해율과 사고사망만인율이 규모별로 분포가 같다”라는 가설에 대한 카이제곱 통계량이 각각 0.519, 8.338 이고 유의확률이 각각 1.000, 0.996인 것을 알 수 있다. 유의 확률값이 일반적인 유의수준 0.05보다 크기 때문에 유의수준 5%에서 가설을 채택하게 된다¹⁵⁾. 따라서 스마트 팩토리 정부지원 사업장, 자동화설비 사업장 및 자동화설비 보유 정부지원 사업장의 재해율과 사고사망만인율이 규모별로 분포가 같다고 할 수 있다.

Table 2에서 “스마트 팩토리 정부지원 사업장, 자동화설비 사업장 및 자동화설비 보유 정부지원 사업장의 재해율과 업무상사고 사망만인율이 업종별로 분포가

같다”라는 가설에 대한 카이제곱 통계량이 각각 9.252, 11.648이고 유의확률이 각각 0.980, 0.928인 것을 알 수 있다. 유의확률값이 일반적인 유의수준 0.05보다 크기 때문에 유의수준 5%에서 가설을 채택하게 된다¹³⁾. 따라서 스마트 팩토리 정부지원 사업장, 자동화설비 사업장 및 자동화설비 보유 정부지원 사업장의 재해율과 업무상사고 사망만인율이 업종별로 분포가 같다고 할 수 있다.

따라서 스마트 팩토리 정부지원 사업장, 자동화설비 사업장 및 자동화설비 보유 정부지원 사업장의 재해율 및 사고사망만인율 비교 분석을 통해서 스마트 팩토리 공정의 위험성을 확인할 수 없다.

2.5 한계점

전체 평균 재해율 비교에서는 자동화설비 보유 사업장이 정부지원 스마트 팩토리 사업장 및 자동화설비 보유 정부지원 스마트 팩토리 사업장보다 1.24배 및 1.05배 높았다. 또한 전체 평균 업무상사고 사망만인율 비교에서는 자동화설비 보유 사업장이 정부지원 스마트 팩토리 사업장 및 자동화설비 보유 정부지원 스마트 팩토리 사업장보다 1.5배 및 2.18배 높았다. 또한 규모별·업종별 비교분석에서도 정부지원 스마트 팩토리 사업장, 자동화설비 보유 사업장 그리고 자동화설비 보유 정부지원 사업장과의 상대적 차별성은 도출되었다.

그러나 통계분석 결과에 따라 규모별·업종별 재해율과 업무상사고 사망만인율에 따른 차별성이 없는 것으로 확인되었으며, 국내 정부지원 스마트 팩토리 사업장의 보급률이 높음에도 불구하고 기초단계 비율이 높고 고도화 비율이 낮은 관계로 산업안전 측면의 스마트 팩토리 위험성과의 연관성이 낮은 관계로 추가 분석이 필요하다.

이에 정부지원 스마트 팩토리 사업장에 대하여 스마트 팩토리로 인한 위험성을 평가하고 감소 방안을 제시하고자 3절에서 스마트 팩토리 공정 실태조사를 실시하였다.

3. 스마트 팩토리 공정 실태조사

국내 스마트 팩토리 사업장의 안전성을 확보하고자 스마트 팩토리 공정의 유해·위험요인 파악 및 문제점 발굴을 위하여 실태조사를 실시하였다.

3.1 대상 선정

먼저, 2014년 2019년까지 정부지원 스마트 팩토리 사업장 중 산업용 로봇, 컨베이어, 프레스 및 사출성형기

Table 3. The list of company subject to status survey

Division	Item 1	Item 2	Item 3	Item 4	Item 5
Area	Pusan	Taegu	Ulsan	Kyung-buk	Kyung-nam
No. place	3	3	4	5	5
Worker No. Scale	9 or less	10~50	50~100	100~300	300 or more
No. place	1	6	5	5	3
Industry	Machine tool, metal, non-metallic mineral product	Electrical machine tool/ precision machine/electronic product	Chemical and rubber product	Textile and textile product	Food
No. place	9	5	3	2	1
Level	Basic	Middle 1	Middle 2	-	-
No. place	15	4	1	-	-
Injury Rate by Industry	Average below	Average over	-	-	-
No. place	11	9	-	-	-

등 자동화설비를 보유한 사업장(306개소)을 구분하였다. 그리고 평가대상 306개소 중 지역별·업종별·규모별·수준별 및 산업재해 발생현황을 고려하여 Table 3과 같이 실태조사 대상 사업장 20개소를 선정하고, 평가표를 활용하여 실태조사 대상 사업장의 스마트 팩토리 공정 실태조사를 실시하고 유해·위험요인 파악을 통해 위험성 감소 방안을 제시하였다.

3.2 방법 및 절차

스마트 팩토리 공정 실태조사를 위한 평가표는 기계류 설계·제작 필수안전보건요건(Machinery Directive, 2006/42/EC), KS B ISO 12100(기계안전-설계 일반원칙_위험성평가와 위험성감소) 및 ISO 12100(Safety of Machinery)를 기반으로 구성하였다¹⁶⁻¹⁸⁾.

평가표 구성 절차는 Fig. 4와 같이 관련 규격을 조사하여 규격별로 항목을 구분하고 내용을 분석하였다.

규격별 분석결과를 토대로 현장 적용성을 고려하여 적용 수준을 결정하고 핵심내용 위주로 정리하였다. 그리고 정리결과를 유형화하여 평가항목을 구성하고 항목별 내용을 단순화 정리하였다. 마지막으로 전문가 의견을 반영하여 최종 평가 항목 및 내용을 구성하였다. 추가적으로 현장 적용성을 높이기 위해 스마트 팩토리 안전시스템 수준별 평가모델과 비교하여 핵심내용 확인 및 수정을 통해 완성도를 제고 하였다¹⁹⁾.

최종적으로 평가표는 일반원칙, 제어, 기계적 위험에 대한 방호, 가드 및 방호장치, 다른 위험요소에

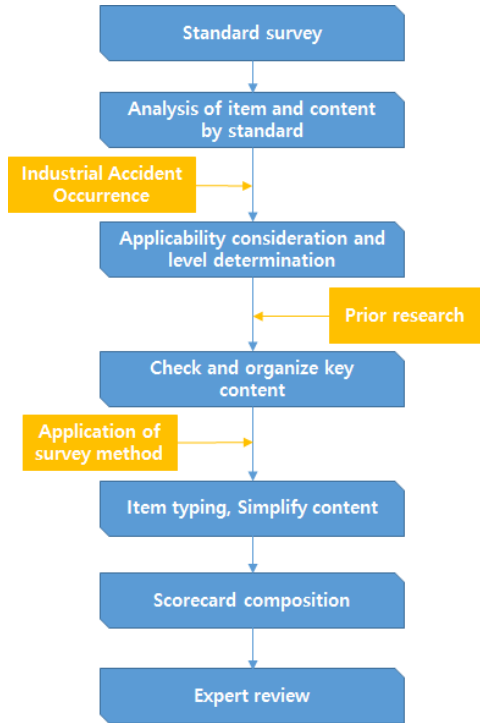


Fig. 4. The Scorecard development process.

대한 방호, 정비 및 정보 등 7개 항목으로 범주화하여 구성하고, 범주화 항목별로 재구분하여 총 52개의 실태조사 세부항목을 구성하였으며 최종적으로는 세부 항목별로 다시 구분하여 총 200개 평가항목을 정리·활용하였다.

3.3 주요 실태

스마트 팩토리 공정은 산업용 로봇, 컨베이어 등이 생산 관련 자동화설비와 조합되어 Fig. 5 및 Fig. 6과 같이 병렬, 직렬 또는 혼합 구조로 구성·운영되고 있다. 제조 등 산업현장에서는 프레스, 사출성형기 등 관련 위험작업을 대체하고 생산성 향상을 위해 산업용 로봇, 컨베이어 등을 사용하고 있지만, 이는 다른 형태·종류의 위험성으로 발현되기도 한다. 따라서 이러한

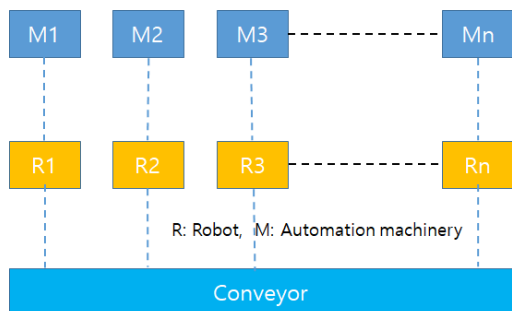


Fig. 5. The production facility layout structure (parallel type).

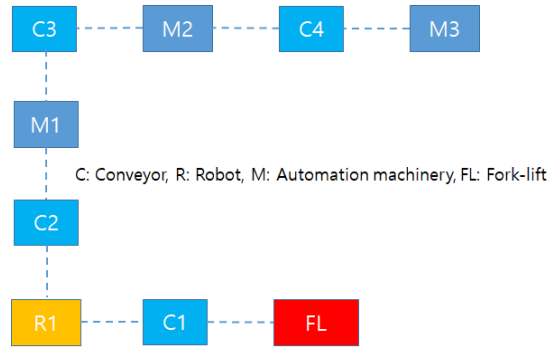


Fig. 6. The production facility layout structure (serial type).

복합 기계·설비의 위험성을 정량적·절대적 증가로 단순하게 고려한다면 위험성 감소 목표를 달성하기 어렵다.

또한, 실태조사 사업장의 스마트 팩토리 구축 비율은 해당 공정에서 평균적으로 약 5~10% 정도이며, 구축 수준은 기초단계가 90%, 구축 시스템은 MES, ERP가 85%로 동일업종의 일반 사업장과 산업안전 측면의 위험성에 대한 차별성은 없었다. 그리고 산업용 로봇과 컨베이어 등이 생산자동화 설비와 조합으로 구성·운영되고 있는 공정 중간에는 작업자가 없었고 공정 시작과 종료 부분에서 작업자가 단독으로 원재료 투입/취출 작업을 하고 있거나 공동으로 일부 조립/검사/분류 작업을 하고 있었다. 다만, 일부 업종을 제외하고는 직접 생산작업보다 유지보수 등의 비정형 작업 비중이 높았다.

3.4 평가결과

스마트 팩토리 공정의 위험성 감소 방안 제시를 위한 유해·위험요인 평가결과를 Table 4와 같이 정리하였다. 평가결과는 실태조사 대상 사업장의 공정을 직렬, 병렬 및 혼합형 형태로 구분하고 평가 항목별로 적합한 항목수를 확인하여 작성하였다. 따라서 스마트 팩토리 공정 형태별로 구분하고 유해·위험요인을 파악하고 비교하여 위험성 및 차별성을 확인하였다.

주요 결과로는 제어시스템, 기계적 위험 및 가드와 방호장치의 요구사항에 대한 방호 항목의 적합율이 36.47%, 48.49% 및 50.71%로 이를 전체 평균과 비교하였을 때 상대적으로 낮아서 해당 항목에 대한 개선이 필요하였다.

특히, 제어시스템 항목 중에서 제어시스템의 안전성과 신뢰성, 제어장치, 정지 기능과 제어 및 운전모드의 세부평가 항목의 적합율이 38.6%, 40.66%, 33.90% 및 32.57%이며 전체 항목수를 고려하여 전체 평균과 비교한다면 상대적으로 적합율이 낮아서 해당 항목에 대한

Table 4. The status survey results table of smart factory process

Category	Item	S	P	H	Conformity	Category	Item	S	P	H	Conformity
	Total	112.5	103.8	83.86	50.15%		Static electricity (No. Item: 6)	2.37	2.20	1.86	
Essential health and safety requirement (No. Evaluation items: 26)	Principles of safety integration (No. Item: 5)	3.50	3.40	3.14			Energy supply other than electricity(No. Item: 1)	0.87	0.80	0.86	
	Materials and products (No. Item: 1)	0.87	0.80	0.71			Errors of fitting (No. Item: 4)	2.75	2.60	2.00	
	Lighting (No. Item: 3)	2.25	2.00	1.43			Extreme temperatures (No. Item: 2)	0.87	0.80	0.86	
	Design of machinery to facilitate its handling(No. Item: 5)	3.75	3.40	2.57	64.31%		Fire (No. Item: 1)	0.75	0.60	0.71	
	Ergonomics (No. Item: 5)	3.75	3.20	2.71			Explosion (No. Item: 1)	0.87	0.80	0.86	
	Operating positions (No. Item: 3)	2.37	2.20	1.28		Risk due to other hazards (No. Evaluation items: 33)	Noise (No. Item: 2)	1.75	1.00	1.00	
	Seating (No. Item: 4)	2.75	2.20	1.86			Vibrations (No. Item: 2)	0.75	0.80	0.71	59.01%
Safety and reliability of control systems(No. Item: 12)	4.87	4.60	4.43		Radiation (No. Item: 3)		3.00	3.00	3.00		
Control system (No. Evaluation items: 61)	Control devices (No. Item: 14)	6.00	5.80	5.28			External radiation (No. Item: 1)	1.00	1.00	1.00	
	Starting (No. Item: 4)	1.12	1.00	0.86	36.47%		Laser radiation (No. Item: 1)	1.00	1.00	1.00	
	Stopping (No. Item: 14)	4.87	4.80	4.57			Emissions of hazardous materials and substances (No. Item: 3)	1.75	1.60	1.14	
	Selection of control or operating modes(No. Item: 11)	3.87	3.60	3.28			Risk of being trapped in a machine(No. Item: 1)	0.75	0.80	0.28	
Protection against mechanical hazard (No. Evaluation items: 23)	Failure of the power supply (No. Item: 6)	2.87	2.60	2.28			Risk of slipping, tripping or falling(No. Item: 2)	0.75	0.80	0.28	
	Risk of loss of stability (No. Item: 2)	1.12	1.2	0.57			Lightning (No. Item: 1)	0.87	0.80	0.71	
	Risk of break-up during operation(No. Item: 6)	3.62	3.2	1.71			Machinery maintenance (No. Item: 4)	2.00	2.00	1.71	
	Risks due to falling or ejected objects(No. Item: 2)	1.12	1.4	0.71		Maintenance (No. Evaluation items: 15)	Access to operating positions and servicing points (No. Item: 1)	0.87	0.40	0.28	
	Risks due to surfaces, edges or angles(No. Item: 1)	0.75	0.60	0.57	48.49%		Isolation of energy sources (No. Item: 6)	3.25	3.20	2.86	52.67%
	Risks related to combined machinery(No. Item: 1)	0.87	0.60	0.57			Operator intervention (No. Item: 3)	1.87	1.80	1.28	
	Risks related to variations in operating conditions (No. Item: 1)	0.87	0.80	0.71			Cleaning of internal parts (No. Item: 1)	0.87	1.00	0.28	
	Risks related to moving parts (No. Item: 3)	1.75	2.00	0.85			Information and warnings on the machinery(No. Item: 1)	0.87	0.80	0.86	
	Protection against risks arising from moving parts(No. Item: 7)	3.25	3.00	1.57			Information and information devices(No. Item: 3)	1.75	1.60	1.14	
	Required characteristics of guard/ protective devices (No. Evaluation items: 27)	General requirement (No. Item: 7)	4.37	4.40	3.71		Information (No. Evaluation items: 15)	Warning devices (No. Item: 3)	1.75	2.00	1.43
Special requirements for guards (No. Item: 8)		5.00	4.60	3.14	50.71%	Warning of residual risks (No. Item: 1)		0.75	0.60	0.43	59.10%
Special requirements for protective devices (No. Item: 12)		6.50	5.20	4.14		Marking of machinery (No. Item: 4)		2.25	2.20	2.28	
	Electricity supply (No. Item: 2)	1.75	0.80	0.86			Instructions (No. Item: 3)	2.25	2.20	1.43	

※ Smart Factory Process Type : Single(S), Parallel(P), Hybrid(H)

개선이 필요하다. 그리고 기계적 위험 항목 중에서 운전 중 파손 위험과 가동부 위험성으로부터 보호의 세부평가 항목의 적합율이 47.38% 및 37.23%이며 이를 전체 항목수를 고려하여 전체 평균과 비교한다면 상대적으로 적합율이 낮아서 해당 항목에 대한 개선이 필요하다. 또한, 가드와 방호장치의 요구사항 항목 중에서 일반 요구사항, 가드의 특별 요구사항 및 방호장치의 특별 요구사항의 세부평가 항목의 적합율이 59.42%, 53.08% 및 44.0%이며 이를 전체 항목수를 고려하여 전체 평균과 비교한다면 상대적으로 적합율이 낮아서 해당 항목에 대한 개선이 필요하다.

실태조사 공정 평가 항목 외 추가적으로 스마트 팩토리 공정에서 로봇 티칭, 금형 교체, 유지보수 및 장애 해결 등의 비정형 작업이 이루어지고 있으나, 해당 작업에 대한 위험성 평가 및 작업시작 전 점검 실시의 경우 약 10% 사업장에서만 적용·실시하고 있었다. 그리고 LOTO(Lock-Out, Tag-Out)의 경우 약 45% 사업장에서 적용·실시하고 있었으나, LOTO 관련 절차서 작성 및 게시, 작업자 교육 실시와 장치(Device) 비치 등은 LOTO 적용 사업장 중 55%만 적용·실시하고 있었다.

3.5 통계분석

스마트 팩토리 공정 평가 항목별 점수가 공정 형태 및 구조에 따라 유의한 차이가 있는지 알아보기 위해 SPSS 25 시스템을 활용하여 일원배치 분산분석(One-way ANOVA)을 Table 5와 같이 실시하였다. Table 5에서 F 통계량의 유의확률이 모두 0.000이므로, 공정평가 7개 모두 항목에 따라 유의하게 차이가 있는 것을 알 수 있다. 그리고 평균 열에 나타난 Turkey의 다중비교 검정결과를 다음과 같이 정리하였다.

첫째, 안전보건 필수요구 항목은 직렬구조보다 병렬구조가 유의하게 크고, 병렬구조보다 복합구조가 유의하게 크다고 볼 수 있다. 둘째, 제어시스템 평가항목은 직렬구조와 병렬구조는 유의한 차이가 없으나 직렬구조에 비해 혼합구조는 유의하게 차이를 보이고 있다. 셋째, 기계적 위험 방호 항목은 직렬구조와 병렬구조는 유의한 차이가 없으나 직렬구조 및 병렬구조에 비해 혼합구조는 유의하게 차이를 보이고 있다. 넷째, 가드 및 방호장치 요구특성 항목은 직렬구조보다 병렬구조가 유의하게 크고, 병렬구조보다 복합구조가 유의하게 크다고 볼 수 있다. 다섯째, 추가적 위험 항목은 직렬구조와 병렬구조는 유의한 차이가 없으나 직렬구조에 비해 혼합구조는 유의하게 차이를 보이고 있다. 여섯째, 유지보수 항목은 직렬구조와 병렬구조는 유의한

Table 5. The ANOVA results table of status survey

Item	Type	N	Average	Standard Deviation	F Statistic (Significance Probability)
Essential health and safety requirement	S	8	19.25 ^A	1.035	30.934 (0.000)
	P	5	17.20 ^B	1.095	
	H	7	13.71 ^C	1.799	
Control system	S	8	23.63 ^A	1.847	4.453 (0.000)
	P	5	22.40 ^A	1.817	
	H	7	20.71 ^B	1.976	
Protection against mechanical hazard	S	8	13.38 ^A	1.768	31.836 (0.000)
	P	5	12.80 ^A	1.304	
	H	7	7.29 ^B	1.496	
Required characteristics of guard/protective devices	S	8	15.88 ^A	0.641	65.579 (0.000)
	P	5	14.20 ^B	0.837	
	H	7	11.00 ^C	1.000	
Risk due to other hazards	S	8	21.88 ^A	2.031	12.522 (0.000)
	P	5	19.40 ^A	2.302	
	H	7	17.14 ^B	1.069	
Maintenance	S	8	8.88 ^A	0.991	9.367 (0.000)
	P	5	8.40 ^A	1.140	
	H	7	6.43 ^B	1.272	
Information	S	8	9.63 ^A	0.916	4.104 (0.000)
	P	5	9.40 ^A	1.517	
	H	7	7.57 ^A	1.902	

※ A<B<C: TURKEY의 다중비교 검정결과임

차이가 없으나 직렬구조 및 병렬구조에 비해 혼합구조는 유의하게 차이를 보이고 있다. 마지막, 정보 항목은 직렬구조와 병렬구조는 유의한 차이가 없으며 직렬구조 및 병렬구조와 혼합구조의 유의한 차이도 없다.

따라서 스마트 팩토리 공정 평가결과를 토대로 통계 분석을 통해 직렬구조, 병렬구조와 혼합구조의 위험성의 차이가 있음을 그리고 혼합구조의 위험성이 더 크다는 것을 확인하였다.

3.6 소결

현재까지는 국내 정부지원 사업장의 스마트 팩토리 구축 수준 및 솔루션 등의 고도화, 자동화 또는 디지털화의 점유율이 낮아서 차별화된 위험성은 확인할 수 없었다. 그럼에도 불구하고 제조의 스마트화로 산업용 로봇, 컨베이어 및 AGV 등이 프레스, 사출성형기 등의 생산 자동화설비와 조합으로 설치·운영되기 때문에 스마트 팩토리 공정의 위험은 점차 대형화, 복잡화, 집적화 및 고도화로 인해 구조화될 것이다.

향후에는 이러한 스마트 팩토리 공정에서 발생할 수 있는 새로운 위험성에 대하여 효과적인 대응을 위해

현장 적용 가능한 위험성 평가 및 위험성 감소에 대한 새로운 방안 정립이 필요하다.

따라서 실태조사를 토대로 스마트 팩토리 공정의 위험성 감소를 위한 개선 필요사항은 다음과 같다.

첫째, 직렬·병렬구조보다는 상대적으로 위험성이 큰 혼합구조 스마트 팩토리 공정의 안전관리가 시급하다.

둘째, 스마트 팩토리 공정의 위험성 감소를 위해 복합 기계류의 안전성능 보장 및 기능 향상을 위해 방호장치 또는 방호조치에 대한 개선이 필요하다.

셋째, 위험성 감소를 위한 방호장치 또는 잠재 위험성에 대한 사용정보 제공만을 고려하고 있으므로 기계·설비류가 예상 가능한 사용조건 및 기타 오사용 조건에서 사용될 때 작업자 등에게 위험하지 않도록 운전·조정이 가능하고 안전이 유지될 수 있도록 당해 기능에 적합한 설계상의 대책이 필요하다.

마지막으로, 위험성 평가 결과에 따른 위험성 감소를 위해 안전조치 관련 입력신호에 응답하여 출력신호를 발생시켜 방호장치 동작상태 및 방호가드 설치상태의 신뢰성을 확보할 수 있는 안전제어 시스템 적용이 필요하다.

이에 스마트 팩토리 공정의 위험성 감소를 위해 혼합 구조의 스마트 팩토리 공정에서 안전제어 시스템의 적용 방안을 4. 스마트 팩토리 공정 위험성 감소 방안에서 제안하고자 한다.

4. 스마트 팩토리 공정 위험성 감소 방안

정부지원 스마트 팩토리 사업장의 공정 실태조사 결과를 토대로 위험성 평가 및 감소 방안을 다음과 같이 제시한다.

4.1 위험성 평가

스마트 팩토리 공정 기계·설비류의 위험성 감소 목표는 Fig. 7과 같이 위험성 평가를 기반으로 하여 설계 단계에서부터 유해·위험요인의 사전 제거, 안전(보호) 조치 및 잔류 위험성에 대한 사용자 정보 제공 등의 3 단계 절차를 통하여 다음과 같이 달성할 수 있다²⁰⁾.

첫째, 설계단계에서부터 유해·위험요인 사전 제거를 위해 기계·설비류의 안전한 설계, 안전한 물질·재료로의 대체, 인간공학 원칙의 적용 등이 필요하다. 둘째, 안전(보호)조치를 위해 설계단계에서부터 안전장치를 반영하고 사용자는 상호 보완적으로 사용 과정에서 발생하는 위험성에 대한 보호조치 실행이 필요하다.

셋째, 잔류 위험성에 대한 사용자 정보 제공은 둘째 단계 수단 적용 후에도 잔류 위험성이 존재하는 경우 경고 정보를 포함한 상세 및 추가 정보를 사용자에게 제공하는 것이다.

4.2 위험성 감소 방안^{21,22)}

스마트 팩토리 공정 기계류의 위험성은 보호조치와 안전제어 시스템 적용 여부에 따라서 허용 가능한 위험성과 잔류 위험성 사이에서 차이가 발생하는데, Fig. 7과 같이 안전제어 시스템의 설계과정을 통해 허용 가능한 위험성과 잔류 위험성의 차이를 최소화하여 위험성 감소 수준을 높일 수 있다. 여기서 위험성 감소 수준은 위험성 평가 및 감소 과정에서 제어시스템의 안전기능 부품류(SRP/CS)의 성능 수준에 따라 상이하게 된다.

즉, 제어시스템 안전기능 부품류의 성능 수준이 높아야만 위험성 감소 효과도 그만큼 커지게 된다. 이처럼 안전제어 시스템을 활용한 보호조치가 추가 적용되는 경우에는 Fig. 7과 같이 제어시스템 안전기능 부품류에 대한 반복적인 설계과정이 필요하다.

세부적인 설계과정은 먼저 위험성 감소과정을 통해 스마트 팩토리 관련 기계류 및 제어시스템 안전성능을 결정하는데, 안전성능은 단일조합 방식으로 제어시스템의 안전기능 부품류에 의해 실현되거나 1개 이상의 제어시스템의 안전기능 부품류를 조합하여 적용한다.

이때 제어시스템의 안전기능 부품류의 역할은 안전제어 시스템 회로의 입력신호에 응답하여 출력신호를 발생시키는 것으로 안전제어 시스템의 설계 완성을 위해서 안전기능의 성능수준(PL: Performance Level)에 대한 결정이 필요하다. 여기서 제어시스템의 안전기능 부품류의 성능 수준은 Fig. 7과 같이 제어시스템의 안전기능 부품류의 특성을 확인하고 부품류별 특성을 구체화하기 위해 해당 절차를 반복하여 수행하여 결정한다.

그리고 제어시스템의 안전기능 부품류의 성능수준(PL)은 단일 구성요소별 $MTTF_d$ (평균위험 고장시간), DC(진단범위), CCF(공통 원인고장) 및 소프트웨어 안전 요구사항 등에 따라 결정된다. 여기서 소프트웨어 안전 요구사항은 전체 수명주기에서 주기별로 발생하는 결함을 회피할 수 있도록 설계되어, 식별 및 판독이 쉬워야 하고 점검 및 유지보수가 가능해야 한다. 다만, 검증 및 확인 활동을 포함한 안전기능 상세화 및 설계의 문서화, 모듈화, 프로그래밍, 기능 점검 그리고 주기적으로 수정 활동이 적용되어야 한다.

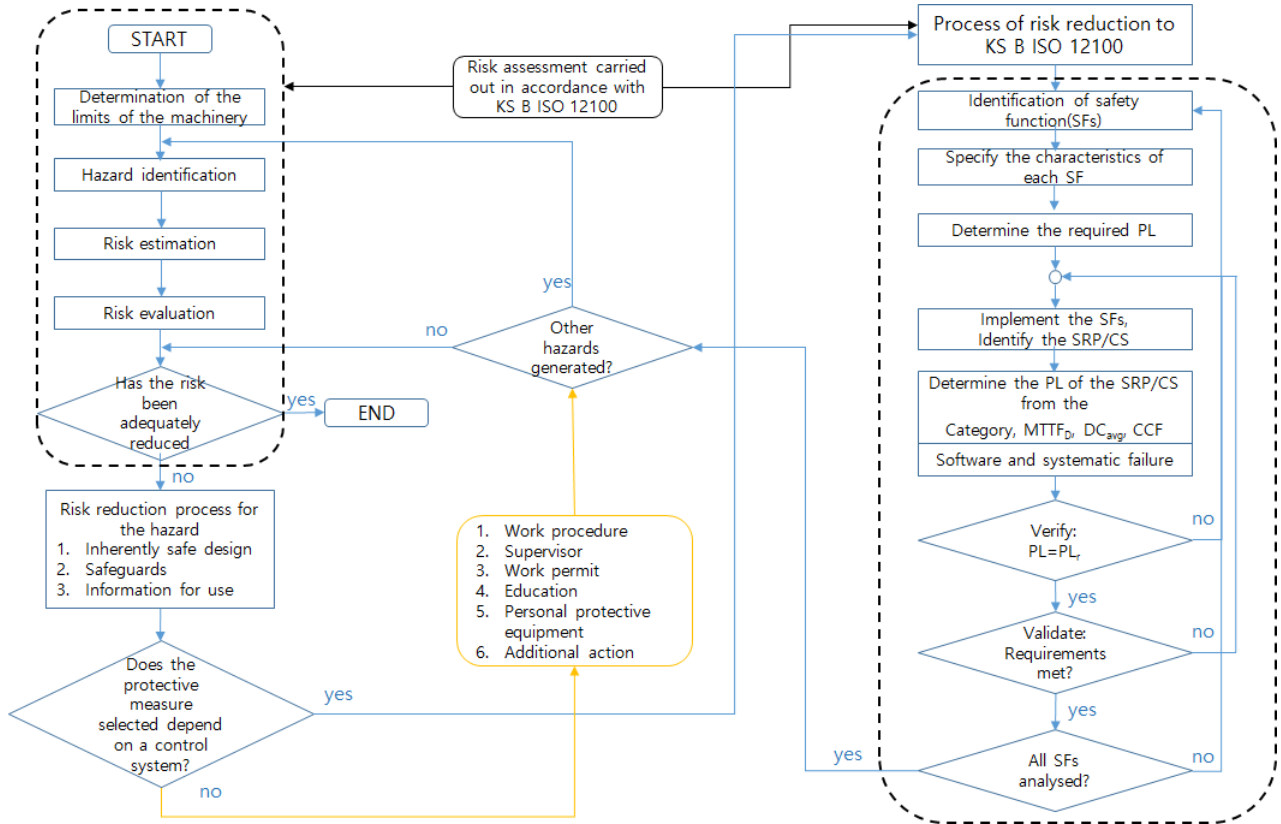


Fig. 7. The design procedure of risk assessment and reduction using the safety control system.

5. 결론

본 논문에서는 2014년부터 2019년까지 정부지원 스마트 팩토리 사업장 12,983개소에 대해 산업안전 측면의 유해·위험요인을 도출하기 위해 자동화설비 보유 사업장 및 자동화설비 보유 스마트 팩토리 정부지원 사업장과 비교하여 산업재해 현황 분석을 실시하였다.

그리고 국내 스마트 팩토리 공정의 위험성 감소를 위해 자동화설비를 보유한 스마트 팩토리 정부지원 사업장 20개소를 선정하고 공정 평가표를 활용한 실태조사를 통하여 위험성을 확인하였다. 또한, 실태조사는 지역별, 규모별, 업종별, 구축수준 및 재해율을 고려하여 실시하였으며, 평가 항목별로 공정 구조에 따른 위험성 차이를 통계 분석을 통해 다음과 같이 확인하였다.

- 1) 안전보건 필수요구 항목 및 가드 및 방호장치 요구 특성 항목에서는 혼합구조, 병렬구조 및 직렬구조 순으로 위험성이 크다.
- 2) 제어 시스템 항목, 기계적 위험 방호 항목, 추가적 위험 항목 및 유지보수 항목에서는 혼합구조가 직렬 및 병렬구조보다는 위험성이 크다.

- 3) 정보 항목에서는 직렬, 병렬 및 혼합구조의 위험성 크기의 차이가 없다.

최종적으로 재해분석 및 실태조사 결과를 반영한 스마트 팩토리 공정의 위험성 평가 및 감소를 위해 다음과 같이 안전제어 시스템의 적용 방안을 제시하였다.

- 1) 스마트팩토리 공정 기계·설비류의 위험성 감소 목표를 달성하기 위해 위험성 평가 및 감소 절차를 제시하였다.
- 2) 위험성 평가 결과에 따른 위험성 감소 수준을 높이기 위해 허용 가능한 위험성과 잔류 위험성의 차이를 최소화하기 위한 방안으로 제어시스템 안전기능 부품류의 성능 수준을 높이기 위한 설계 과정을 제시하였다.

본 연구결과를 토대로 스마트 팩토리 공정의 구조화·내재화된 위험성 발현을 위험성 평가 및 감소 시스템으로 안전한 수준으로 통제할 수 있다면 인간 중심의 관점에서 스마트 팩토리를 안전하고 효과적으로 활용함으로써 산업재해예방 및 생산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- 1) Jung E. M. et al., “Korean Smart Manufacturing Strategy”, Research Report 2019-929, KIET, 2019.
- 2) IACT, “Manufacturing Engineering Design Technology and Industry Trend Report”, IACT, 2020.
- 3) Markets&Markets, “Smart Factory Market-Global Forecast & Analysis to 2024”, Markets & Markets, 2019.
- 4) Markets&Markets, “South Korea Smart Factory Market”, Markets & Markets, 2019.
- 5) D. Y. Park, “Moon Jae-in Government’s Industrial Safety Policy Evaluation and Improvement Direction”, National Assembly Policy Debate, 2021.
- 6) S. W. Choi, “Development and Its Characterization of a Worker’s Safety Activity Detection Apparatus using Smart Phone”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 30, No. 3, pp. 20-25, 2015.
- 7) J. H. Won. et al., “A Study on Activation Policy of Smart Construction Safety Cost by Analyzing Actually Estimated Amount in Safety Management Plan”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 37, No. 3, pp. 34-44, 2022.
- 8) S. W. Choi, “Development and Its Characterization of a Worker’s Safety Activity Detection Apparatus using Smart Phone”, Vol. 30, No. 3, pp. 20-25, 2015.
- 9) Y. S. Park, “A Study on the Necessity of Reinforcing the Industrial Machine Safety System (Device/System)”, Vol. 36, No. 3, pp. 15-23, 2021.
- 10) Ministry of Small and Medium Venture Business, “Achieved 20,000 Smart Factories Supply”, Press Release, 2021.
- 11) H. G. Park, “Manufacturing Innovation Strategy and Data Collection and Utilization Infrastructure KAMP Construction Plan, AI EXPO KOREA 2020”, Smart Manufacturing Innovation Promotion Team, 2020.
- 12) J. M. Kim, “A Study on the Smart Factory Reference Model’s Improvement”, Korea Small Business Institute, 2020.
- 13) Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), “Industrial Accident Statistics”, KOSHA, 2014-2020.
- 14) J. H. Byeon, “The Study on the Safety and Health Level of Smart Factory”, Korea Occupational Safety and Health Institute(OSHRI), 2021.
- 15) E. H. Seo, “Statistics Analysis with SPSS 24”, Free Academy Publisher, 2020.
- 16) European Union, “Annex I (Machinery Directive, 2006/42/EC)”, Official Journal of the European Union, 2006.
- 17) ISO, “ISO 12100:2010, Safety of Machinery-General Principles for Design-risk Assessment and Risk Reduction”, 2010.
- 18) Korean Standards Association, “KS B ISO 12100:2021, Safety of Machinery-general Principles for Design-risk Assessment and Risk Reduction”, 2021.
- 19) D. J. Park, “Development of Evaluation Model for Each Level of Smart Factory Safety System”, Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), 2019.
- 20) Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), “Explanation of Safety Design and Manufacturing Standards for Industrial Machinery”, KOSHA, 2010.
- 21) DGUV, “Functional Safety of Machine Controls, IFA Report2/2017e”, DUGV, 2019.
- 21) Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), “Technical Guidelines for Designing Safety-related Parts of Control Systems for Machine Safety”, KOSHA, 2017.