

인쇄회로기판 제조 공정에서 위험성평가와 안전조치 적용 사례 연구

이영만* · 이인석**†

A Case Study of Risk Assessments and Safety Measures in a PCB Manufacturing Process

Young Man Lee* · Inseok Lee**†

†Corresponding Author

Inseok Lee

Tel : +82-31-670-5286

E-mail : lis@hknu.ac.kr

Received : April 25, 2022

Revised : July 24, 2022

Accepted : July 25, 2022

Abstract : Printed circuit boards (PCBs) are a basic component in the electronics industry and are widely used in nearly all electronic products, such as mobile phones, tablet computers, and digital cameras, as well as in electric equipment. PCB manufacturing involves the use of many chemicals and chemical processes and therefore has more risks than other manufacturing sectors. This study aims to identify the causes of possible accidents during PCB manufacturing through risk assessment, develop and implement safety measures, and evaluate the effectiveness of these measures. Note that the safety measures developed to mitigate the risks of a certain process were also implemented for other similar processes. The risk assessments conducted over seven years, from 2015 to 2021, at a PCB manufacturing company identified 361 hazardous processes. Between 2016 and 2019, 41-56 hazardous processes were identified per year; such processes decreased to fewer than 20 per year after 2020. Application of the risk assessment results to the improvement of the hazardous processes with the similar characteristics seems to be effective in decreasing the risks. Equipment-related factors such as lack of appropriate maintenance, low work standards, and defective protection devices were responsible for 59.8% of all possible accidents. Because PCB manufacturing involves many chemicals, skin contact with hazardous substances, electric shock, fire, and explosion were the most common types of possible accidents (81.7%). In total, 505 safety measures were implemented, including 157 related to purchase and improvement of equipment and devices for safety (31.1%), 147 related to the installation/modification of fire prevention facilities (29.1%), and 69 related to the use of standard electrical appliances (13.7%). Risk assessment conducted after implementing the safety measures showed that these measures significantly decreased risk; 247 processes (68.4%) had a risk level of 3, corresponding to “very low,” and 114 processes (31.6%) showed a risk level of 4, corresponding to “low.” In particular, risk assessment of 104 processes with risk scores of 12 and 10 other processes with risk score of 16 showed that the risk decreased to 4 after implementing the safety measures. Thus, implementing these measures in similar manufacturing sectors that involve chemical processes can mitigate risk.

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

Key Words : 4M, chemical materials, case study, PCB(Printed Circuit Board), risk assessment, safety measures

1. 서론

인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB)은 전자제

품 산업에서 기초가 되는 부품으로 휴대폰, 테블릿 PC, 디지털카메라, 자동차 전장제품 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. PCB는 1940년대에 양산화된 이후로 양

*한경대학교 토목안전환경공학과 박사과정 (Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University)

**한경대학교 사회안전시스템공학부(안전공학전공) 교수 (School of Social Safety Systems Engineering & Research Center for Safety and Health, Hankyong National University)

면 PCB와 다층 PCB 개발 등 기술 발전이 계속되어 온 전자산업의 기본 핵심 분야이다¹⁾.

4차 산업혁명과 맞물려 IT기술의 발전과 함께 PCB 산업은 계속 성장하고 있으며, 한국은 국제적으로 PCB 산업의 핵심 국가 중 하나이다. 2020년 세계 전자회로 기판 시장규모는 635억불 규모로 전년 대비 약 3.8%가 증가하였다. 전 세계 PCB 시장의 약 81.8%는 한국, 중국, 일본, 대만 등 동북아 국가가 점유하고 있으며, 한국은 약 12.4%로 세계 3위의 PCB 생산 국가이다²⁾.

일반 제조 공정에 비해 PCB 제조 공정에는 다양한 화학 물질이 사용되고 있으며, 이로 인한 다양한 유해·위험 요인을 내포하고 있다. PCB 제조 공정의 사고 발생 위험의 대표적인 사례는 다음과 같다³⁾. 1) 에칭공정(etching)에 사용하는 화학물질인 염산, 황산 등은 부식성이 강한 특성이 있다. 부식성이 강한 화학물질을 저장 및 이송 할 때는 내부식성 소재인 PE(Poly Ethylen), PP(Poly Propylene), 또는 PVC(Poly Vinyl Chloride) 등의 배관을 이용하게 되는데, 이들 소재의 배관은 스테인레스 강관(stainless steel)에 비해 외부 충격에 취약한 특성이 있다. 2) 제조공정 중 화학물질을 공급탱크(service tank)로 이송하는 장치로 기어 및 다이어프램 펌프(diaphragm pump)가 많이 사용되고 있는데, 이 장치의 배관 및 부속품에서 열화나 충격으로 인해 균열이 발생하여 화학물질이 누출되는 사고가 많이 발생한다. 3) 공급탱크 내부에 정량의 화학물질을 보관하기 위해 수위 센서를 설치하여 일정 단계로 수위를 관리하고 있는데, 센서의 불량과 관리미흡으로 화학물질이 월류하여 사고가 발생하기도 한다. 그리고 4) 화학물질을 혼합하는 과정에서 황산, 과산화수소, 안정제 등의 재료를 투입할 때 정해진 순서와 다르게 작업하여 비정상적 화학물질 반응에 의한 유독가스가 발생하는 위험성도 있다.

우리나라에서는 실제로 PCB 제조 공장에서도 화학물질 관련 사고가 많이 발생하고 있다⁴⁾. 예를 들어, 2017년 3월에 경기도 소재 A공장에서도 에칭탱크에 염산을 주입하던 중 연결된 공급탱크로 염산이 역류하고 작업자가 밸브를 닫지 못한 채 유독가스가 발생하여 근로

자 12명이 대피하는 사고가 있었다. 2017년 9월 경기도 소재 B 공장에서는 공급탱크에서 과산화수소가 월류하여 연결된 탱크의 염산과 반응하여 염화수소 가스가 발생하여 34명이 병원으로 후송되는 사고가 있었다. 그리고, 2017년 10월 인천 소재 C공장에서는 PCB공정 내 염소산나트륨과 염산 저장탱크의 밸브를 개방한 후 월류로 인한 두 물질 간 반응으로 유독가스가 발생하여 2명이 병원으로 후송된 바 있다.

이와 같이 PCB 제조업은 일반 제조업에 비해서 화학약품을 많이 사용하고 있어, 그로 인한 사고 발생 빈도 또한 높다고 할 수 있다. 고용노동부에서 발표한 2020년 산업재해 통계에 따르면 전년에 비해 전체적으로 재해율이 0.79%p 감소하였다. 재해유형별 분석 결과에서는 떨어짐, 끼임, 절단 등 대부분의 유형에서 재해자 수가 감소하였는데, 화재·폭발·파열은 재해자 수가 490명에서 549명으로 12.0%, 사망자 수는 37명에서 72명으로 94.6% 증가하였다(Table 1)⁵⁾. 화재·폭발·파열은 화학물질의 취급과 관련이 큰 재해로서 화학물질이 많은 업종에서 이러한 재해를 예방하기 위한 노력이 더 필요하다고 할 수 있다.

최근 우리나라는 위험성평가의 의무화를 법제화하여 산업안전관리 체계의 변화를 통해 재해 예방의 수준을 높이고자 하고 있다⁶⁾. 전통적인 사고 예방 접근 방식은 기 발생한 산업재해의 원인을 조사하고 동종·유사 재해의 재발 방지 대책을 수립하여 이를 작업장에 적용하는 방식이었으나, 위험성평가를 바탕으로 한 안전 관리는 잠재적인 유해 위험을 적극적으로 파악하고 위험도를 평가하여 사고 예방 대책을 수립하여 자율적으로 안전관리 체계를 운영하는 방식이다. 다양한 유해 화학물질이 사용되고 있고 생산 공정이 다양화·복잡화되고 있는 PCB 제조 공정은 위험성평가를 기반으로 한 적극적인 안전관리의 도입이 필요한 대표적인 분야라고 할 수 있다.

본 논문에서는 국내 한 PCB 제조업체에서 다년간 위험성평가를 실시한 사례를 소개하고, 위험성평가의 주요 결과와 개선대책을 소개하고자 한다. 위험성평가는 업종과 사업장의 환경 등에 따라 위험 요인, 위험성

Table 1. Number of occupational injuries according to the types of accidents occurred in Korea in 2019 and 2020

Type		Fall	Crush	Amputation cut stabbed	Fire explosion rupture	Overexertion	the others	Total
2020	Victim	14,406	12,894	10,374	549	4,343	49,817	92,383
	Death	328	98	1	72	0	383	882
2019	Victim	15,103	13,007	10,734	490	4,548	50,165	94,047
	Death	347	106	4	37	0	361	855
Variation	Victim	-697	-113	-360	59	-205	-348	-1,664
	Death	-19	-8	-3	35	0	22	27

의 특성 및 정도, 위험도 경감을 위해 필요한 개선 대책 등이 달라질 수 있다. 본 논문은 화학물질을 사용하는 다양한 제조 공정에서 위험성평가를 기반으로 한 안전관리의 사례로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 PCB 제조 사업장 및 제조 공정

본 연구의 대상 사업장은 휴대폰, 테블릿 PC, 디지털 카메라와 자동차 전자제품용 PCB를 생산하는 업체로서, 약 580명이 근무하고, 연간 매출액이 약 3,070억 원 정도인 중견 기업이다. 이 업체는 약 27,000 m² 규모의 생산 공장과 폐수처리장, 자재창고, 기숙사 등 13동의 부속건물을 보유하고 있다.

대상 사업장은 다음과 같은 일반 PCB 제조 공정에 따라 PCB를 생산하고 있으며, 제품의 사양과 고객 요청에 따라 일부 변동이 있다.

- 1) 원자재 입고 및 검사: 원판의 내층 두께, 동박 두께 등을 확인 후 입고
- 2) 내·외층 회로 형성: 다층의 내부 회로와 바깥쪽의 회로 형성 공정
- 3) 중간검사: 각 공정마다 작업이 완료되면 매뉴얼에 따라 검사 장비를 통해서 회로 형성 유무 확인
- 4) 적층: 다층회로를 형성하기 위해서 내층회로를 고온, 고압을 통해서 여러 판을 하나의 기판으로 만드는 공정
- 5) 드릴: 다층회로를 형성하기 위해서 내층기판들을 서로 연결 또는 구분하기 위한 홀 가공 공정
- 6) 도금: 드릴 작업 시 발생하는 홀의 Burr를 제거하고 세척 후 건조하며 내층회로 홀 부분 도금작업
- 7) 인쇄: 장기 보존과 회로 보호를 위한 외층 회로부분 인쇄 공정
- 8) 금도금: 회로에서 부품의 접촉을 원활하게 하기 위한 도금 공정
- 9) 라우터: 제품의 크기에 맞도록 재단하는 공정
- 10) 최종 검사 및 출고: 회로 형성 및 동작 유무 확인 후 출고

2.2 위험성 평가 방법

본 연구에서는 2015년부터 2021년까지 7년간 PCB 제조 공정에 대한 위험성평가를 실시하였다. 위험성평가 방법과 운영은 고용노동부의 위험성 평가 지침 해설서⁷⁾와 한국산업안전보건공단의 KRAS(Korea Risk Assessment System)⁸⁾를 참고하여 적용하였다.

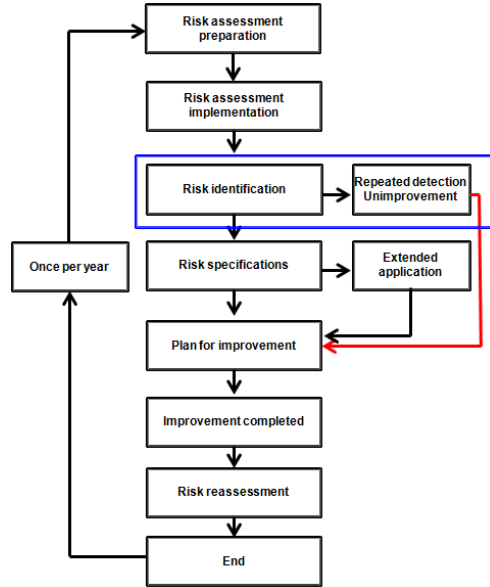


Fig. 1. Process of risk assessment.

본 연구의 위험성평가 운영 기본 절차는 Fig. 1과 같다⁹⁾. 여러 장소에서 동일한 설비가 사용되거나 유사한 공정이 다수 있는 경우에는 대표 공정을 대상으로 위험성평가를 실시한 후 그 결과를 동일 설비 혹은 유사 공정으로 확대 적용(extended application of safety measures)하였다. 개선 대책의 경우에 확대 적용한 공정에서 모두 완료되어야 개선이 완료된 것으로 간주하였다⁸⁾. 또한 개선이 완료된 후 다음 연도 위험성평가에서 위험도가 높은 것으로 재평가된 경우에는 개선이 완료된 것을 취소하고 개선계획서 수립 대상에 다시 포함시키는 방식으로 운영하였다.

파악된 유해·위험요인의 위험도를 추정할 때는 KRAS를 참고하여 재해의 발생 빈도(가능성) 점수와 발생 강도(중대성) 점수를 곱하는 방식을 적용하였다. 재해 발생 빈도는 4단계로 나누어 ‘최대’, ‘대’, ‘중’, ‘소’로 구분하고, 재해 발생 강도는 5단계로 나누어 ‘최상’, ‘상’, ‘중’, ‘하’, ‘최하’로 분류하였다(Table 2).

발생 빈도 점수와 발생 강도 점수의 곱에 의한 위험도 점수는 1~20점으로 산출하였다(Table 2). 해당 유해·위험요인의 위험도 수준은 위험도 점수를 바탕으로 6단계로 분류하였다(Table 3). 1) 1~3점은 현재의 안전 대책을 유지하는 단계, 2) 4~6점은 안전 정보 및 안전 교육의 제공이 필요한 단계, 3) 8점은 표지 부착, 작업 절차서 표기 등 대책이 필요한 단계, 4) 9~12점은 정비, 보수 기간 대책을 수립하고 개선이 필요한 단계, 5) 15점은 긴급 임시 안전보건 대책 수립 후 작업이 필요한 단계, 6) 16~20점은 즉시 작업을 중지하고 작업을 지속하려면 즉시 개선을 실행해야 하는 단계로 정의하였다.

Table 2. Risk assessment matrix by frequency and severity of related injuries

Type	Frequency of occurrence (likelihood)			
	Less likely	Likely	More likely	Highly likely
Least severe	1	2	3	4
Less severe	2	4	6	8
Severe	3	6	9	12
Very severe	4	8	12	16
Extremely severe	5	10	15	20

Table 3. Classification of risk levels

Score	Description	Responses
1-3	Very low	Maintain current safety measures
4-6	Low	Safety information and safety education needed
8	Neutral	Measures (signboards, operating procedures, etc.) needed
9-12	Moderately high	Establish maintenance/repair period, take measures for improvement
15	High	Establish temporary emergency safety and health measures before starting work
16-20	Very high	Suspend work immediately (resume work after taking immediate improvement action)

위험성평가는 크게 제조공정, 부속공정, 기타로 구분하여 진행하였다. 제조공정은 원자재가 투입되고 완제품이 나오는 전 공정이 포함된 것이며, 부속공정은 생산에 필요한 유틸리티, 약품탱크, 폐수처리장으로 분류하고, 기타에는 완제품을 보관하는 창고, 기숙사 등을 포함하였다.

위험성평가 수행은 기본적으로 각 공정의 관리감독자가 실시하였으나, 위험성평가 방법에 대한 지도 및 평가 내용에 대한 점검과 개선 대책 수립과정에는 최소 10년 이상의 직무 경험이 있는 환경안전, 방재, 유틸리티 전문가 4명이 적극적으로 참여하였다.

위험성평가 결과를 분석하는 과정에서 재해 유형에 따른 사고발생 원인을 추정하고 분류하였다. 사고발생 원인은 4M 방식을 채택하였는데¹⁰⁾, 이는 개선 대책 수립 과정에서 발생 가능한 재해의 원인을 체계적으로 추정하고 분석하여 대책을 수립하기 위한 목적이다.

3. 결과 및 토의

3.1 위험성 평가 및 개선 대책 실시 공정수

2015년~2021년에 실시한 위험성평가 대상 공정수와 유사 공정으로 인한 확대적용 공정 수는 Table 4와 같다. 2015년 처음 실시한 위험성평가에서 개선이 필요한 유해·위험요인은 확대적용 건수를 포함하여 131건

Table 4. Number of processes for applying risk assessments

Description	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Total
No. of processes assessed	58	42	29	31	35	13	10	218
No. of processes for extended application	73	10	12	17	21	4	6	143
Total	131	52	41	48	56	17	16	361

이 도출되었고, 2016년~2019년에는 연별로 41~56건 수준으로 감소되었고, 2020년 이후에는 연간 20건 미만으로 감소하였다. 이는 위험성평가 결과를 확대 적용하여 동일한 설비와 공정에 개선 대책을 적용하였기 때문인 것으로 보인다.

3.2 사고 원인 및 재해 유형 분석

매년 실시한 위험성평가 결과를 산업안전보건법 시행규칙에 따라 사고의 원인 유형을 인적 요인, 설비적 요인, 작업·환경적 요인, 관리적 요인으로 구분하고, 해당 유해·위험요인과 관련성이 가장 큰 재해 유형을 파악하여 분석하였다(Table 5).

사고원인은 설비적요인 중 점검정비 부족, 작업표준이 부족, 방호장치 불량에 전체에서 59.8%로 가장 높게 나왔고, 그로 인한 재해 유형으로는 다량의 화학물질을 취급하는 PCB 제조업 특성상 위험 물질의 접촉, 감전, 화재 및 폭발이 80.7%로 가장 많았다. 이러한 결과로부터 PCB 제조업에서 설비에 의한 사고 원인으로 화학물질 접촉, 그에 따른 감전과 화재가 발생할 확률이 높은 것으로 파악된다.

일반 제조업에서는 협착에 의한 사고가 상대적으로 높은 것에 반해 PCB제조업은 협착 위험이 6.4%(23건)으로 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 한편, 기타의 재해 유형(5.8%)은 제품을 다른 공정으로 이동할 때 차를 사용하는 것과 관련된 사고와 그에 따른 중량물 취급으로 인한 근골격계 질환 등이었다.

3.3 위험성 평가에 따른 개선 대책

매년 위험성평가를 실시하여 그에 따라 대책을 수립하고 실시하였다. 7년간 361건의 위험요인을 개선하기 위해서 총 505건이 개선대책이 시행되었다. 개선 계획에 따라 시설이 변경되면 개선공사에 따른 안전교육이 수반되기 때문에 위험요인보다 개선대책의 수가 많게 되었다.

본 연구에서는 개선대책을 사고원인 유형에 따라서 분석하였다(Table 6). 사고원인 유형에 따른 개선 대책은 구매 및 개선공사 157건(31.1%), 소방시설 설치, 변경 147건(29.1%), 규격 전기제품 사용 69건(13.7%) 순으로 높게 나왔다. 사고원인 유형에 따라서는 안전교

Table 5. Numbers of the risks classified by risk factors and type of accidents (%)

Description	Constriction	Fall	Hazardous substance contact	Electric shock	Fire Explosion	Trip	Abnormal temperature contact	Oxygen deficit suffocation	Others	Subtotal	Total
Unconscious behavior	-	-	-	-	-	-	-	-	-		0 (0.0%)
Error	1	-	2	-	-	-	-	-	3		6 (1.7%)
Fatigue	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7 (1.9%)	0 (0.0%)
Age	-	-	-	-	-	-	-	-	-		0 (0.0%)
Communication	-	-	-	-	-	-	1	-	-		1 (0.3%)
Design defects	-	-	-	-	-	-	-	-	-		0 (0.0%)
Defective protection device	12	2	-	-	1	1	2	-	-	216 (59.8%)	18 (5.0%)
Insufficient operating standards	4	1	37	14	8	-	-	1	3		68 (18.8%)
Insufficient check-ups and maintenance	-	2	29	20	74	1	1	-	3		130 (36.0%)
Work information issue	-	-	-	-	-	-	-	-	1		1 (0.3%)
Working motion issue	-	-	-	-	-	-	-	-	-	61 (17.0%)	0 (0.0%)
Work method issue	2	-	4	1	-	-	-	-	-		7 (1.9%)
Work environment issue	2	5	19	7	15	1	-	1	3		53 (14.7%)
Management organization issue	-	-	-	-	-	-	-	-	1		1 (0.3%)
Inadequate manual	-	-	16	5	11	-	-	-	5	77 (21.3%)	37 (10.2%)
Insufficient safety education	1	-	3	3	11	1	1	1	-		21 (5.8%)
Lack of guidance and supervision	1	-	5	-	6	2	2	-	2		18 (5.0%)
Subtotal	23 (6.4%)	10 (2.8%)	115 (31.9%)	50 (13.9%)	126 (34.9%)	6 (1.7%)	7 (1.9%)	3 (0.8%)	21 (5.8%)	361 (100%)	361 (100%)

육이 포함된 관리적 요인이 221건(43.8%), 설비적 요인이 216건(42.8%), 작업환경적 요인 61건(12.1%), 인적 요인 7건(1.4%)으로 파악되었다.

대표적인 개선대책 중 하나인 구매 및 개선공사는 펌프로 공급되는 약품 배관에 압력을 낮추기 위해 옥상에 Small Tank를 설치하고 자연압으로 배관을 통해 공급탱크로 보내는 이송 방법을 변경하여 화학물질 배관 압력을 0.2 Mpa 이하로 낮출 수 있었고, 소방시설 설치·변경의 경우는 제조 동 전체 층에 스프링클러설비를 설치하여 화재 제어에 의한 소화와 피난유도 시간을 확보하여 재실자가 안전하게 피난 층으로 피난할 수 있게 하였다.

3.4 위험도 산정 결과

위험성평가에 의한 위험도 산정 결과는 Table 7과 같다. 위험도 점수 6점으로 ‘낮음’에 해당하는 공정은 361건 중 60건(16.6%)이었으며, 위험도 점수 9점으로

‘약간 높음’이 187건(51.8%), 위험도 점수 12점으로 ‘높음’이 104건(28.8%), 위험도 점수 16점으로 ‘매우 높음’에 해당하는 공정이 10건(2.8%)으로 나타났다.

개선 대책을 실시한 이후 위험성평가를 실시한 결과 위험도 수준이 크게 낮아졌다(Table 7). 개선 실시 후 위험도 점수 3점으로 ‘매우 낮음’에 해당하는 공정이 총 247건(68.4%), 위험도 점수 4점으로 ‘낮음’에 해당하는 공정이 총 114건(31.6%)로 나타났다. 세부적으로는 개선 전 위험도 6점이었던 60개 공정과 위험도 9점이었던 187건이 위험도 3점으로 개선되었다. 개선 전 위험도 12점이었던 104건의 공정과 위험도 16점이었던 10건의 공정이 모두 위험도 4점으로 위험성이 낮아지는 결과를 보였다.

Table 7에서 개선대책 실시 이후에도 위험요인에 의한 재해의 중대성은 크게 떨어지지 않고 재해 가능성 점수가 상대적으로 많이 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 개선대책 실시로 해당 위험요인이 완전히 제거되지

Table 6. Numbers of the risks classified by risk factors and safety measures (%)

Description	Interlock	Handrail pole Toe plate	Fire equipment installation /modification	Use of standard electric devices	Purchase/ improvements	Installation of protective covers	Emergency device & equipment	Others	Subtotal	Total (share)	
Human factor	Unconscious behavior	-	-	-	-	-	-	-	-	0 (0.0%)	
	Error	1	-	2	-	-	-	3	6 (1.2%)		
	Fatigue	-	-	-	-	-	-	-	7 (1.4%)	0 (0.0%)	
	Age	-	-	-	-	-	-	-	-	0 (0.0%)	
	Communication	-	-	-	-	-	1	-	-	1 (0.2%)	
Equipment factor	Design defects	-	-	-	-	-	-	-	-	0 (0.0%)	
	Defective protection devices	12	2	-	-	1	1	2	216 (42.8%)	18 (3.6%)	
	Insufficient operating standards	4	1	37	14	8	-	1	3	68 (13.5%)	
	Insufficient check-ups and maintenance	-	2	29	20	74	1	1	3	130 (25.7%)	
Work environment factor	Work information issue	-	-	-	-	-	-	1	-	1 (0.2%)	
	Work motion issue	-	-	-	-	-	-	-	-	0 (0.0%)	
	Work method issue	2	-	4	1	-	-	-	-	61 (12.1%)	7 (1.4%)
	Work environment issue	2	5	19	7	15	1	1	3	53 (10.5%)	
Managerial factor	Management organization issue	-	-	-	-	-	-	1	-	1 (0.2%)	
	Inadequate manual	-	-	16	5	11	-	-	5	221 (43.8%)	37 (7.3%)
	Insufficient safety education	22	10	35	22	42	6	7	21	165 (32.7%)	
	Lack of guidance and supervision	1	-	5	-	6	2	2	2	18 (3.6%)	
Subtotal	44 (8.7%)	20 (4.0%)	147 (29.1%)	69 (13.7%)	157 (31.1%)	12 (2.4%)	14 (2.8%)	42 (8.3%)	505 (100%)	505 (100%)	

Table 7. Results of risk assessments before and after applying safety measures

Before improvement				After improvement			
Likelihood	Severity	Risk score	No. of items	Likelihood	Severity	Risk score	No. of items
2	3	6	60 (16.6%)	1	3	3	60 (16.6%)
3	3	9	187 (51.8%)	1	3	3	187 (51.8%)
3	4	12	104 (28.8%)	1	4	4	104 (28.8%)
4	4	16	10 (2.8%)	1	4	4	10 (2.8%)
Total		361 (100%)		Total		361 (100%)	

않는 한 사고 발생에 따른 재해 손실의 중대성은 크게 변화하지 않는 점을 반영하였기 때문이다. 많은 경우에 개선 대책 실시 이후 해당 위험요인으로 인한 재해 발생 가능성이 중대성에 비해 상대적으로 더 크게 낮아진다고 할 수 있다.

4. 주요 개선 대책 사례

본 연구에서 위험성평가에 따라 위험도 수준을 낮추기 위해 실시한 개선 대책 중 대표적인 사례들을 사고 요인 유형별로 정리하였다.

4.1 인적 요인에 대한 개선대책 사례

인적요인으로 인한 사고 위험 공정에 대한 대표적인 개선 사례는 유체 흐름 표시와 옥외계단 설치가 있다.

화학물질 이송 배관에서 화학물질이 누출되는 사고 발생 시 화학물질에 따라 화학물질 노출자 응급조치 방안과 방제 방법이 달라질 수 있기 때문에 이송 배관마다 화학물질을 표시하는 것이 필요하다. 기존에는 위험도가 높은 염산, 황산, 질산 등의 물질 이송 배관 위주로 유체흐름 표시를 하고 있어, 이를 전체 이송배관에 확대 적용하는 개선 대책을 실시하였다(Fig 2). 개선 과정에서 배관 용도에 따라 색구분을 달리하고

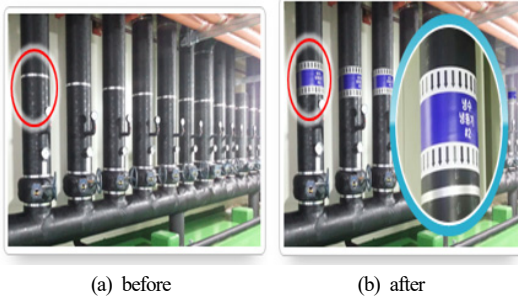


Fig. 2. A case of safety measure : Display for chemical flows.

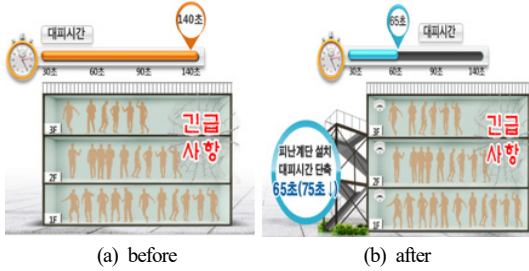


Fig. 3. A case of safety measure : Emergency stairs outside the building.

배관의 크기에 따라 유체흐름 표시 및 글자의 크기를 달리 적용하였다. 배관의 크기는 32 mm이하, 40~150 mm이하, 200 mm 이상으로 구분하여, 배관 크기별로 표시와 글자의 크기를 달리하였다. 그리고, 덕트의 경우는 주덕트(main duct)와 부속덕트(sub duct)로 구분하고 배관과 같은 방법으로 유체흐름표시 및 글자의 크기를 달리하였다^{11,12)}.

당 사업장은 근무하는 작업자들이 위급한 상황에 피난하기 위한 비상구까지의 수평거리는 45 m로 관련 법규상 별도의 피난경로가 필요하지 않으나, 단위체적당 수용인원 및 다중 피난경로를 고려하여 옥외계단을 별도로 설치하였다. 이러한 대책을 통해 상시 근로자 280명 기준으로 재실자 피난시간을 기존 140초에서 65초로 약 75초 단축시키는 효과가 있었다(Fig. 3). 검증의 방법으로는 Egress Model Pathfinder 2011를 적용하였다¹³⁾.

4.2 설비적 요인에 대한 개선대책 사례

설비적 요인에 대한 대표적인 개선 사례는 리크센서, 자동식 소화설비 도입이 있다.

누출감지기(leak sensor)는 화학물질 누출 시 조기에 감지하여 경보를 함으로써 피해를 최소화 할 수 있는 감지기다. 기존 설비에 부착된 레벨센서는 일정량의 화학물질이 누출이 되어야 감지하며 조기경보를 할 수 없는 단점을 갖고 있으며 리크센서의 경우에는 바닥에 부착이 되어 소량의 누출에도 신속하게 감지할 수 있다. 본 사례에서는 Fail safe 관점에서 레벨센서와 리크센서

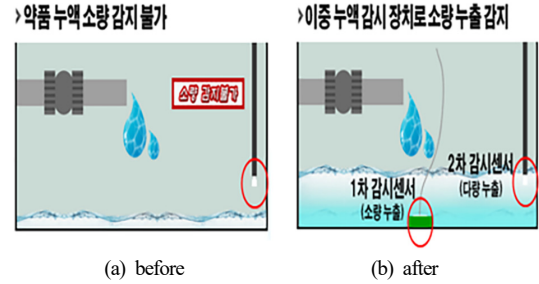


Fig. 4. A case of safety measure : Additional sensors for detecting leak of chemicals.

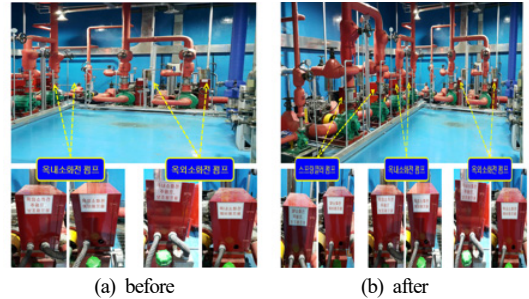


Fig. 5. A case of safety measure : Additional automatic system for extinguishing fires.

를 이중으로 설치하여 시스템에 대한 안전성을 높였다¹⁴⁾.

자동식 소화설비는 공장의 경우 지하층, 지상 4층 이상으로써 바닥 면적이 500 m² 이상인 경우에 법적 설치 대상이 되며 규모가 크지 않은 대부분의 사업장은 법적 적용 대상에서 제외된다. 그러나 화재로 인한 인명, 재산피해를 최소화하고 화재 제어에 의한 소화와 연소반응에 의한 연소생성물의 발생량을 감소시켜 재실자의 피난시간을 확보할 수 있기에 해당 사업장에서는 자동식 소화설비를 추가 설치하였다¹⁵⁾.

4.3 작업 · 환경적 요인에 대한 개선대책 사례

작업 · 환경적 요인에 대한 대표적인 개선 사례는 자동 폐쇄장치, 가연성가스 감지기를 추가한 것이다.

자동폐쇄장치인 방화문의 경우 건축물 연면적이 1,000 m² 이상인 경우에 방화구획을 하여야 한다. 방화구획은 상시 닫혀 있는 상태를 유지하여야 하지만, 당 사업장의 경우 제조 특성상 수시로 대차를 이용하므로 방화문을 개방한 상태로 유지하고, 방화문 전용의 화재감지기를 설치하여 감지기 동작 시 연동하여 자동으로 방화문이 닫히도록 시스템을 구축하였다¹⁶⁾.

기존 위험물을 보관하는 옥내 저장소에는 방폭형 정온식감지기와 위험물 중에 자체 증기압이 낮은 물질이 누출 시 제거하기 위해 급·배기설비를 설치하여 유지 관리하고 있었으나 산업안전보건법 경우 인화점 60도 이하의 장소에는 방폭 구역 지정 및 위험물이 누출시

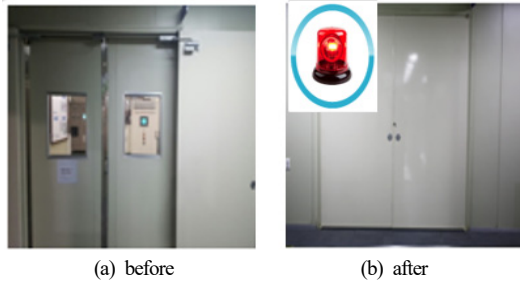


Fig. 6. A case of safety measure : interlocking fire walls.

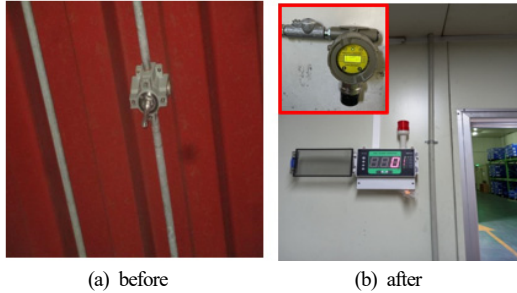


Fig. 7. A case of safety measure : Gas detecting sensors.

조기에 감지할 수 있는 방폭형 가연성가스 감지기를 추가로 설치하여 안전성을 이중으로 확보하였다¹⁷⁾.

4.4 관리적 요인에 대한 개선대책 사례

관리적요인에 대한 대표적인 개선 사례는 화학물질 공급방식 변경, 화학물질 배관관리 통한 효율적 관리가 있다.

기존 화학물질 공급방식은 옥외탱크에서 각 공정탱크로 공급하기 위해 펌프를 사용하며 배관에는 상시 0.7~0.9 Mpa 압력이 형성되어 배관에 충격이나 시간경화로 인한 누출이 발생하면 배관내에 있는 화학물질이 비산되어 주위에 있는 근로자 접촉시 사고가 발생된다. 따라서 배관의 압력을 낮추기 위해 옥상에 Small Tank를 설치하고 자연압을 이용한 배관 시공을 하여 압력을 낮출 수 있었다. 사업장의 건물높이가 18.5 m로 자연 압으로 환산 시 0.185 Mpa이며 지상 1층 공급탱크로 보내는 배관은 가장 높은 압력이 되며 지상 2~3층 공급탱크로 공급하는 배관은 그보다 낮은 압력으로 공급할 수 있도록 개선하였다(Fig. 8)¹⁸⁾.

현장에 설치되어 있는 PE, PP, PVC 연결부위에 경화 및 노후로 인한 파손이 발생하면 화학물질이 파손된 부위로부터 비산되어 주위 작업자에게 접촉되어 사고가 발생한다. 따라서 비산이 발생되지 않도록 바닥으로 누출이 될 수 있도록 보호커버를 설치하고 바닥에 누출된 화학물질이 확산되지 않도록 Dike를 설치하여 개선하였다(Fig. 9).

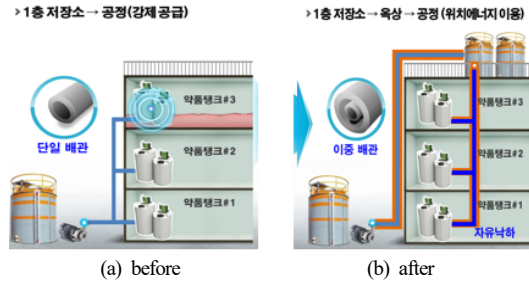


Fig. 8. A case of safety measure : Modification of the system of supplying chemicals.

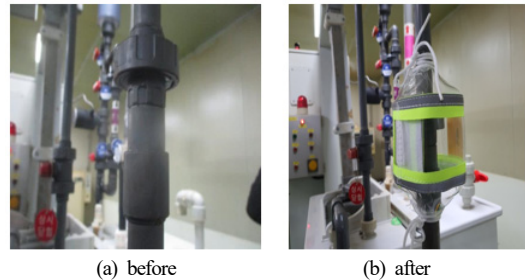


Fig. 9. A case of safety measure : Applying dikes in the links of pipes for chemicals.

5. 결론

본 연구는 유해화학물질을 많이 취급하고 있는 국내의 한 PCB제조 사업장에서 실시한 위험성 평가의 주요 결과를 분석하여 주요 개선 대책을 제시하는 사례 연구로 수행되었다.

중견 규모의 PCB제조 사업장에서 2015년부터 2021년까지 7년간 실시한 위험성평가에서 총 361건의 유해·위험 공정이 파악되었고, 2016년~2019년에는 연간 41~56건, 2020년 이후에는 연간 20건 미만으로 감소하였다. 당 사업장에서는 위험성평가 후 개선 대책을 수립할 때 대상 공정을 확대적용하도록 하는 지침을 준수하였다. 위험도 수준의 경감과 개선 대상 공정의 효과적인 감소를 위해서는 위험성평가의 확대적용이 중요한 것으로 보인다.

사고원인 유형별로는 설비적 요인 중 점검정비 부족, 작업표준 부족, 방호장치 불량 등이 전체에서 59.8%로 가장 높게 나왔고, 그로 인한 재해 유형으로는 다량의 화학물질을 취급하는 PCB 제조업 특성상 위험 물질의 접촉, 감전, 화재 및 폭발이 80.7%로 가장 많았다. 이러한 결과로부터 PCB 제조업에서 설비에 의한 사고 원인으로 화학물질 접촉, 그에 따른 감전과 화재가 발생할 확률이 높은 것으로 파악된다. 개선대책 수립으로는 총 505건에서 구매 및 개선공사 157건(31.1%), 소방시설 설치, 변경 147건(29.1%), 규격전기 제품 사용 69

건(13.7%) 순으로 확인되었다.

개선 대책을 통해 위험성평가를 실시한 결과 위험도 수준이 크게 낮아졌다. 개선 실시 후 위험도 점수 3점으로 ‘매우 낮음’에 해당하는 공정이 총 247건(68.4%), 위험도 점수 4점으로 ‘낮음’에 해당하는 공정이 총 114건(31.6%)로 나타났다. 세부적으로는 개선전 위험도 6점이었던 60개 공정과 위험도 9점이었던 187건이 위험도 3점으로 개선되었다. 개선전 위험도 12점이었던 104건의 공정과 위험도 16점이었던 10건의 공정이 모두 위험도 4점으로 위험성이 낮아지는 결과를 보였다. 그리고, 본 논문에서는 대표적인 개선대책 사례 일부를 구체적으로 제시하였다.

사업장의 위험성평가를 담당하는 업무담당자들이 호소하는 어려움 중 하나는 정보와 교육의 부족이었다. 업무 담당자에 따라 위험성평가의 내용과 품질이 달라질 수 있음을 어려워하였다. 이에 대한 대책으로, 위험성평가 업무 수행자들에게 주기적인 정보제공과 교육이 이루어질 필요성이 있다. 또한, 유사업종에서 실시된 위험성평가의 적용 사례에 대한 구체적이고 다양한 정보가 필요하다. 그러한 점에서 본 사례연구는 화학물질 취급 사업장을 포함하여 다양한 업종에서 위험성평가에 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

다만, 이 연구는 한 중견 PCB제조 기업에서 수행된 위험성평가 자료만을 활용한 것이기 때문에, 이 연구의 결과를 그대로 일반화시킬 수는 없다. 사업장의 위험성은 동일 업종이라도 규모와 현장 특성에 따라 달라질 수 있으니 이를 주의할 필요가 있다. 향후, 본 연구의 결과를 타 사업장 자료와 비교하여 위험성평가의 실무 참고자료를 확장해나가는 연구를 하고자 한다.

References

- 1) S. G. Hong, Introduction of New PCB Manufacturing Technology, 9, 2014.
- 2) Korea Printed Circuit Association (KPCA), Status of PCB Industry in Korea, 2020.
- 3) C. H. Park, H. S. Kim, B. H. Jeon and D. H. Kim, “Study on Safety Management Plan through Chemical Accident Investigation in PCB Manufacturing Facility Etching Process”, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 19, No. 4, pp. 132-137, 2018.
- 4) Chemical Substances Information Center, Accident Casebook, National Institute of Chemical Safety. <https://icis.me.go.kr/search> Total. do.
- 5) Ministry of Employment and Labor, Status of Industrial Accidents, 12, 2020.
- 6) J. W. Jeong, Notes to Risk Assessment, 36-46, 2015.
- 7) Ministry of Employment and Labor, Guide to Risk Assessment. Ministry of Employment and Labor, 2021.
- 8) Korea Occupational Safety and Health Agency, Risk Assessment Support System, <https://kras.kosha.or.kr>.
- 9) D. Y. Jeong, “A Study on Problems and Improvement of Domestic Risk Assessment”, Thesis, Seoul National University Of Science And Technology, 2019.
- 10) S. H. Seo, J. I. Weon and H. S. Woo, “Effective Detection Technique of Near Miss using 4M Risk Assessment Methodology”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 27, No. 5, pp. 164-169, 2012.
- 11) J. G. Jeong, M. S. Bang, H. S. Kang and H. I. Jeong, “A Study on the Improvement of the Railway Safety Sign for Enhancing Visibility and Legibility”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 5, pp. 171-176, 2016.
- 12) S. G. Kim, S. E. Jin and Y. K. Nam, “An Evaluation and Improvement of the Safety Signs for Increasing Recognition Rate”, Journal of the Ergonomic Society of Korea, Vol. 39, No. 2, pp. 109-117, 2020.
- 13) J. S. Jang and D. H. Rie, “A Comparative Study for Dispersion Model in Evacuation Plan by using MAS-based Evacuation Simulation”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 29, No. 1, pp. 59-63, 2014.
- 14) E. B. Lee, S. I. Kwak and Y. B. Choi, “Technical Criterion of Safety Evaluation of Leakage Preventing Plates for Alleviating Space Shortage Between Chemical Storage Tank and Dike”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 5, pp. 42-50, 2018.
- 15) M. N. Hur and C. S. Shin, “An Experimental Study on the Extinguishing Performance of Sprinkler Heads according to Discharge Coefficient”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 2, pp. 32-38, 2018.
- 16) I. K. Park, D. S. Jang, Y. W. Lee, O. H. Kwon and D. H. Doh, “Unsteady Heat Transfer of Fire Door Exposed to High Temperature”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 15, No. 1, pp. 59-65, 2000.
- 17) K. H. Oh, H. S. Kim and C. H. Lee, “A Study on The Explosion Characteristics of Flammable Gases”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 7, No. 3, pp. 66-72, 1992.
- 18) B. T. Yoo, E. B. Lee and J. G. Kim, “Development on the Safety Management System of Hazardous Chemicals under the Chemicals Control Act:Focusing on Safety Assessment System”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 34, No. 3, pp. 96-101, 2019.