

전자산업 포토 공정 설비 정비 작업 안전보건 가이드

정은교 · 권세영¹ · 이규승² · 한택현³ · 박동욱^{4*}

오산대학교 안전보건관리과, ¹한국산업안전보건공단, ²SK 하이닉스, ³삼성전자 상생EHS팀, ⁴한국방송대학교 보건환경학과

Development of a General Occupational Safety and Health Guide for Maintenance Work in the Photolithography Process in the Electronics Industry

Eun Kyo Chung · Seyoung Kwon¹ · Kyu Seung Lee² · Taek-hyeon Han³ · Dong-Uk Park^{4*}

Department of Safety and Health, Osan University

¹*Korea Occupational Safety and Health Agency*

²*SK Group*

³*Partner Environment & Safety Team, Samsung Electronics*

⁴*Department of Environmental Health, Korea National Open University*

ABSTRACT

Objectives: The aim of this study is to develop a comprehensive occupational safety and health (OSH) guide for maintenance tasks within the photolithography process in the semiconductor industry.

Methods: The development of the OSH guide involved a literature review, consultations with experts in the field of relationships, and field investigations. It concentrates on maintenance work operations in these specialized fields.

Results: As a result, a detailed OSH guide was developed to address maintenance work in photolithography process facilities within a semiconductor manufacturing line. This guide is structured to assist maintenance workers through the pre-, during, and post-maintenance work phases, ensuring easy comprehension and adherence to safety and health protocols. It highlights the necessity of safety and health measures throughout the maintenance work process in order to protect personnel. The guide is enriched with real-life scenarios and visual aids, including cartoons and photographs, to aid in the understanding and implementation of safety and health principles.

Conclusions: This OSH guide will contribute to improving safety in the electronics industry by providing practical measures to address safety and health risks associated with maintenance work in the photolithography process.

Key words: Maintenance work, occupational safety and health guide, photolithography process

I. 서 론

반도체 제조공정은 높은 정밀도와 복잡성을 요구하는

작업이다. 특히 포토 공정(photo lithography)은 미세 회로 패턴을 형성하는 핵심 공정으로, 여러 단위공정으로 구성된다. 이러한 공정은 다양한 화학물질과 고온의

*Corresponding author: Dong-Uk Park, Phone: +82-2-3668-4707, E-mail: pdw545@gmail.com
Department of Environmental Health, Korea National Open University, 86 Daehak-ro, Jongnogu, Seoul, 03087, Republic of Korea

Received: November 12, 2024, Revised: December 1, 2024, Accepted: December 20, 2024

 Dong-Uk Park <https://orcid.org/0000-0003-3847-7392>

 Eun Kyo Chung <https://orcid.org/0000-0001-7866-7081>

 Seyoung Kwon <https://orcid.org/0009-0005-8209-4171>

 Kyu Seung Lee <https://orcid.org/0009-0000-1189-6816>

 Taek-hyeon Han <https://orcid.org/0009-0005-4972-6253>

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

장비를 사용하므로, 작업자의 안전과 보건을 유지하기 위한 체계적인 관리가 필요하다. 최근 반도체산업의 제조공정들은 사무자동화를 통해 자동화되어 공정 운전자들이 화학물질에 노출될 위험은 많이 감소하였다. 그러나 8인치 라인은 아직도 수작업을 해야 하는 경우가 많고, 포토 공정 설비와 지원설비 등을 정비할 때 수작업으로 해야 하는 경우가 있다. 이 과정에서 작업자는 화학물질 노출 등 다양한 안전보건 위험에 직면하게 된다 (Park et al., 2011).

최근 들어 산업재해 예방을 위한 안전보건 가이드의 필요성이 강조되며, 이를 바탕으로 포토 공정의 정비 작업에 초점을 맞춘 가이드를 개발할 필요성이 높다 (Kim et al., 2024).

본 연구의 목표는 포토 공정에서 발생할 수 있는 잠재적 위험을 분석하고, 정비 작업 시 작업자의 안전과 건강을 보호하기 위한 일반적인 안전보건 가이드를 개발하는 것이다(SEMI, 2012; SEMI, 2024).

II. 연구 방법 및 범위

1. 연구 방법

본 연구에서는 문헌 조사와 현장 조사를 병행하였다. 주요 연구 방법은 다음과 같다.

문헌 조사는 포토 공정 관련 문서, 안전보건 가이드 라인, 사고 사례 분석을 통해 기본 데이터를 수집하는 방식으로 진행하였다. 먼저 문헌 고찰을 통해 반도체산업의 포토 공정 설비 정비 작업에서 발생하는 일반적인 안전보건 위해·위험 요인을 정리하였다. 문헌 고찰 시 PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>)와 bing.com (<https://www.bing.com/>)에 “포토 공정(photo process in semiconductor)”, “safety and health risk in semiconductor industry”, “chemicals using in photo process in semiconductor industry” 등의 키워드를 사용했으며, 검색한 문헌 중 본 연구와 연관된 결과를 정리하였다.

현장 조사는 전자산업 현장(반도체 공장 2개소, 디스플레이 공장 2개소, 전자부품 제조업체 2개소)을 대상으로 수행하였다. 이때 실제 포토 공정 설비를 운영하는 작업 현장에서 정비 작업자(반도체 공장 8명, 디스플레이 공장 8명, 전자부품 제조업체 4명)와 인터뷰하였고, 해당 작업별 위해·위험 요소를 분석하였다. 그리

고 문헌 고찰에서 정리한 안전보건 가이드 초안은 사업장 공정 설비 정비 작업을 조사한 후 수정, 보완하였다.

이후 문헌 고찰을 통해 안전보건 가이드 초안을 만들고, 현장 조사를 통해 수정, 보완하였다. 그리고 가이드 수정본에 대해 안전보건 전문가와 공정 전문가로부터 추가 교정 등의 자문을 받아 가이드를 완성하였다. 반도체산업의 포토 공정 설비 정비 작업에 대한 안전보건 가이드 전문은 부록으로 수록하였고, 본 연구에서는 안전보건 가이드의 핵심 목적과 내용 등을 설명하였다.

본 연구와 관련된 자세한 연구 방법은 “전자산업 공정 설비 작업 안전보건 가이드 개발” 논문에서 제시하였다(Lee et al., 2023).

2. 연구 범위

본 연구의 범위는 반도체 제조공정 중 포토 공정의 단위공정인 코팅, 노광, 현상 공정 설비 정비 작업에 초점을 맞추어, 운전과 유지보수 단계에서 주요 위해·위험 요소를 식별하고 이에 대한 안전보건 가이드를 개발하는 것이다.

본 연구에서 정비 작업은 예방정비(preventive maintenance; PM)와 사고 정비(breakdown maintenance or corrective maintenance; BM)를 포함하였다. PM은 장비 고장을 방지하고 지속적으로 공정 작동을 보장하며 원활하게 유지하기 위하여 정기적으로 수행하는 공정 설비 세정, 장비와 부품 등 교체와 설치, 공정 작동 조건 검증 등을 포함한 직무 활동이다. BM은 공정 설비, 기계, 장비, 소자 등 고장이나 결함이 있는 구성 요소를 수리하거나 교체하여 공정 설비의 작동 상태를 정상으로 복원하는, 비정기적으로 운영되는 직무 활동이다(Safety Culture, 2024). 유럽 안전보건청에서 개발한 표준인 EN 13306:2010에서는 정비를 ‘품목의 수명주기 동안 품목을 유지하거나 복원하기 위한 모든 기술적, 행정적, 관리적 조치의 조합, 그리고 필요한 기능을 수행할 수 있는 상태로 복원하는 것’으로 정의하였다(Muylaert et al., 2010). 본 연구에서 안전보건 가이드에 수록한 정비 작업은 포토 공정의 단위공정인 표면처리, 포토레지스트(photoresist, PR) 코팅, 굽기, 노광, 현상 공정 설비에서 일반적으로 수행하는 정비 작업, 즉 재해를 예방하고 공정효율을 높이기 위해 정기적 또는 비정기적으로 공정 설비를 멈추고 청소하며 기계, 부품 등을 교체하는 작업으로 정의하였다.

III. 연구 결과

1. 포토 공정의 원리

포토리소그래피(Photolithography)는 빛을 이용한 석판인쇄술로, 빛을 마스크라는 설계도면에 투사해서 웨이퍼(wafer) 또는 유리 기판 위에 감광막 층을 새겨 넣는 기술이다. 포토 공정은 반도체 제조에서 회로 패턴을 형성하기 위한 핵심 기술이다.

미래의 포토 공정은 선폭, 공간, 포토레지스트 두께 등을 얼마나 줄이느냐가 관건이다. 이를 위해서는 광원 뿐만 아니라 포토레지스트 코팅, 굽기, 깎기 등의 기술이 최첨단이 되어야 하는데, 이를 위해서는 원자단위의 미세한 구조에서 역학적, 전기적 특징까지도 고려해야 한다(OSHA, 2024).

포토 공정의 기본적인 단위공정은 다음과 같다.

(1) 표면처리 공정

표면처리 공정의 이전 공정인 산화 공정에서 실리콘 산화막이 코팅된 웨이퍼 표면은 친수성으로 접착력이 떨어지기 때문에, 표면처리 공정에서는 웨이퍼 표면의 접착력을 높이기 위해 무극성의 소수성으로 만들어 준다. 이때 사용하는 물질은 헥사메틸디실라잔(CAS#999-97-3, Hexamethyldisilazane, HMDS)이다.

(2) 포토레지스트 코팅 공정

스핀(Spin)을 이용하여 감광액인 포토레지스트를 웨이퍼에 도포하는 공정이다. 도포 방법에는 정적(static) 또는 동적(dynamic) 분배 방식이 있다. 포토레지스트의 특성과 주요 성분은 다음과 같다(Shao et al, 2019).

① 수지, resin(or polymer)

- 고분자(polymer)로서, 탄소화합물이며 빛에 반응하지 않음.
- 물리적 특성을 결정함
 - 접착력(adhesion) : 웨이퍼에 붙는 정도
 - 화학적 저항(chemical resistance) : 현상액(developer)에 녹지 않는 정도
 - 점도(viscosity) : 두께 관리(control) 가능한 정도를 말함. 형태를 유지하며, 현상액에 쓸려 가지 않게 함.

② 광활성 화합물, photoactive compound(PAC) (or sensitizer)

- 고분자로서, 탄소화합물을 가지며, 빛에 반응함. 화학적 반응(reaction)을 통해 포토레지스트의 용해도(solubility)를 결정함.
- 종류
 - 양성 포토레지스트(positive PR) : 탄소 사슬(carbon chain)이 여러 개 교차해 영긴 상태(cross-linked)에 빛을 받으면 사슬(chain)이 끊어지고 현상액에 잘 녹음. 폴리머로 페놀(phenol)이나 포름알데히드(formaldehyde) 사용
 - 음성 포토레지스트(negative PR) : 영긴 상태에 빛을 받으면 사슬이 끊어지지 않도록 굳어짐. 폴리머로 폴리이소프렌(polyisoprene) 사용

③ 용제(Solvent)

- 유기물(organic)로서 탄소화합물을 가짐.
- 용액으로 존재하며, 포토레지스트 박막을 만들어 보관하는 데 사용함. 빛을 막기 때문에 노광(exposure)하기 전에 반드시 제거해야 함. 프로필렌 글리콜 모노메틸 에테르[107-98-2, propylene glycol monomethyl ether(PGME)], 프로필렌 글리콜 모노메틸 에테르 아세트산[108-65-6, propylene glycol monomethyl ether acetate (PGMEA)] 등을 사용함.

반도체 미세 기술의 진보에 따라 자외선 파장에 대응하는 포토레지스트의 변화를 보면, 과거에는 파장이 365~436nm인 i-line, g-line UV(ultraviolet) 기술이 쓰이다가, 최근에는 고해상도 패턴을 구현하는 광원으로 파장 248nm와 193nm의 DUV(deep ultraviolet) 기술, 파장 13.5nm의 EUV(extreme ultraviolet) 기술이 사용되고 있다. EUV 시스템은 2025년 85%를 차지할 것으로 예측한다. Table 1은 광원에 대한 파장대별 UV의 종류와 포토레지스트의 재료를 나타낸 것이다.

포토레지스트의 감광 특성을 좌우하는 요소로는 민감도, 분해능, 대조도, 점도, 접착도, 식각 저항 등이 있다.

(3) 굽기 공정

굽기 공정은 pre-bake, post-bake, hard-bake가

Table 1. PR materials by wavelength of UV light sources

Lithography System	Resins	PACs	Solvents
i-line (365nm) and g-line (436nm) UV	Positive-PR: Novolac (phenol, formaldehyde) Negative-PR: Polyvinylphenol, polyisoprene rubber	DNQ (diazonaphthoquinone) Sulfonium Iodonium Salts	Ethyl lactate PGMEA**** 2-Heptanone
DUV (deep ultraviolet) - 248 nm (KrF) and 193 nm (ArF)	CARs** PHS (polyhydroxystyrene) Methacrylate-based polymers PAGs (Photoacid generators)	PACs* TPS-t (triphenyl sulfonium triflate) Iodonium Salts	Casting solvents PGMEA Ethyl lactate Cyclohexanone
EUV (extreme ultraviolet) (13.5nm)	MORs*** PMMA (polymethyl methacrylate), PAGs, Quencher n-CARs	Triarylsulfonium salts Diaryliodonium salts	PGMEA Ethyl Lactate

* PACs: Photoactive compounds
 ** CARs: Chemically amplified resists)
 *** MORs: Metal oxide resists)
 **** PGMEA: Propylene glycol monomethyl ether acetate

있다. Pre-bake 공정은 포토레지스트를 웨이퍼 표면에 도포한 후 포토레지스트에 포함된 유기용제(Solvent)를 제거하기 위한 공정으로, 포토레지스트의 부착력을 높이고 균일성을 높이기 위한 공정이다. 일반적으로 30초 동안 100℃ 내외로 굽는다.

Post-bake 공정은 노광 공정 후에 열운동을 통해 울퉁불퉁한 정상파(standing wave effect)가 발생하는 가장자리(edge)를 평탄화(smoothing)하여 해상도를 높이기 위해 굽는 공정으로, 자외선 저항에 필요한 110~130℃로 1분 정도 가열된 판 위에서 굽는다. 정상파를 줄이기 위해서 유기화합물을 표면이나 바탕에 코팅하여 빛이 반사되지 않게 한다(SKhynix news room, 2024).

Hard-bake 공정은 포토 공정의 최종 단위공정인 현상 공정 후에 웨이퍼 표면에 패턴화된 포토레지스트의 부착력을 개선하고 남은 용매를 증발하기 위한 공정으

로, 100~180℃에서 굽는다.

구울 때는 오븐(oven)이나 핫플레이트(hot plate)를 이용한다. 오븐법은 회분식(batch type)으로 여러 장 동시에 구울 수 있지만, 가열 시 조각이 생길 우려가 있다. 핫플레이트법은 한 장씩 구워야 하지만, 가열 시 조각이 생기지 않는다.

(4) 정렬과 노광 공정

정렬과 노광 공정은 마스크를 포토레지스트가 코팅된 웨이퍼의 정확한 위치에 정렬한 후, 자외선에 웨이퍼를 노출하여 웨이퍼에 마스크 이미지를 그대로 전사하는 공정이다. 전체 포토 공정의 60%를 차지할 정도로 중요한 단위공정이다. 마스크는 석영유리와 크롬을 사용한다.

Table 2는 광원으로 사용되는 자외선의 종류, 스펙트럼 기술, 광원의 파장과 공정 로드 에 따른 기술 진보

Table 2. Wavelength and process technology lod by UV light source

Light source	Types of light sources	Wavelength	Semiconductor technology lod of the process
Mercury lamp	g-line	436	500
	h-line	405	450-350
	i-line	365	350-250
Excimer laser	KrF (DUV)	248	250-130
	ArF (DUV)	193	180-14
Laser-produced plasma (LPP) or discharge-produced plasma (DPP)	Extreme ultraviolet (EUV)	13.5	14 or less

현황을 보여 준다.

앞으로도 선풍 등을 더 줄여서 더 미세화하려면 광원의 파장이 더 짧아져야 하므로, UV 다음 영역인 X선이 사용될 수도 있다.

노광 방법에는 3가지가 있다. 마스크를 웨이퍼에 붙이는 접촉 노광법, 마스크와 포토레지스트 사이에 간격을 두는 근접 노광법, 마스크와 포토레지스트 사이에 렌즈를 놓아 움직이면서 전사하는 투과 노광법이 있다. 현재 가장 많이 사용하는 방법은 투과 노광법(projection printing)이다.

(5) 현상 공정

현상 공정은 마스크의 패턴에 의해 발생한 노광된 부분과 노광되지 않은 부분의 용해도 차이를 이용하여 웨이퍼 표면의 포토레지스트 패턴을 완성하는 공정으로, 현상, 세척, 건조 순으로 진행된다. 현상 방법에는 에멀션법과 스프레이법이 있다. 에멀션법은 간단한 형태로, 현상액 용기와 세척액 용기를 나란히 준비하여 웨이퍼를 현상액과 세척액에 순서대로 담근 후 건조하는 방법이다. 스프레이법은 스핀 코터를 이용하여 웨이퍼를 진공 척에 올려 두고 순차적으로 현상액과 세척액을 분사한 후, 마지막으로 고속 회전으로 건조하는 방법이다.

현상액은 사용하는 포토레지스트에 따라 양성 포토레지스트(positive PR)와 음성 포토레지스트(negative PR)로 나뉜다. 양성 포토레지스트는 노광된 부분을 카르복실산(carboxylic acid)으로 바꿔 알칼리성 현상액인 수산화테트라메틸암모늄(75-59-2, tetramethylammonium hydroxide, TMAH)과 수산화나트륨(NaOH)을 사용하여 쉽게 녹게 하고, 세척액으로 이온수(DI water)를 사용한다. 음성 포토레지스트는 노광되지 않은 부분을 크실렌(1330-20-7, xylene), 에틸벤젠(100-41-4, ethyl benzene), 스토다드 솔벤트(8052-41-3, Stoddard solvent)에 담가 박리(strip)하고, 세척액으로 아세트산부틸(123-86-4, N-Butyl acetate)을 사용한다.

2. 포토 공정 운전 및 설비 정비 작업에서 주요 안전보건 위험

(1) 화학물질

반도체산업에서 포토 공정에서는 포토레지스트, 희석제(thinner), 현상액(developer), 포토레지스트 제거제(stripper), 웨이퍼와 포토레지스트의 접착력을 높이는 접착향상제(adhesion promotor) 등이 사용된다(Misra et al., 2002). 포토레지스트는 감광성 성분, 용

매, 수지, 첨가제 등으로 구성되어 있다. 포토레지스트의 감광성 성분은 기술 개발에 따라 다양하게 변화하고 있다. 포토레지스트용 수지로는 페놀(크레졸)-포름알데히드계의 노보락 수지(Novolak resin)를 비롯하여 폴리비닐페놀계 수지, 폴리하이드록시스타이렌계 수지, 아크릴계 수지 등 다양한 종류의 수지가 사용된다(KOSHA, 2012).

현재 사업장에서는 유기용제로 프로필렌 글리콜 모노메틸 에테르, 프로필렌 글리콜 모노메틸 에테르 아세트산, 2-헵타논(110-43-0, 2-heptanone), 아세트산부틸, 에틸젓산염(687-47-8, ethyl lactate) 등 끓는점(boiling point)이 150°C 전후인 물질을 주로 사용한다. 이러한 유기용제성분은 사용되는 수지와 감광성 성분에 따라 차이가 있다.

현상액으로는 수산화테트라메틸암모늄이 일반적으로 사용되며, 프로필렌 글리콜 모노메틸 에테르 아세트산, 지방족탄화수소, 크실렌 등도 사용된다(Lin et al., 2010).

밀착향상제로는 헥사메틸디실라잔을 사용한다. 포토 공정에서 사용된 포토레지스트는 1차적으로 포토레지스트 제거제로 제거하는데, 에탄올아민(141-43-5, ethanolamine), 카테콜(120-80-9, catechol), 프로필렌 글리콜 모노메틸 에테르, 프로필렌 글리콜 모노메틸 에테르 아세트산 등을 사용한다. 포토레지스트 제거는 주로 포토 공정에서 이루어지는데, 식각 공정에서 이루어지는 경우도 있다. 정비 작업 중에는 위에 열거한 화학물질과 부산물, 잔류물, 폐액 등에 노출될 수 있다(Park SH et al., 2012).

(2) 물리적 위험

포토 공정에서는 광원으로 자외선이나 극자외선을 사용한다. 자외선은 노출될 경우 피부와 눈에 심각한 손상을 줄 수 있으므로 적절한 차단과 보호 장치가 필요하다. 그리고 고온 작업 중에는 화상의 위험이 있다.

또한 이물질 제거 시 플라즈마 사용으로 인한 라디오파에도 노출될 수도 있다. 그리고 전기를 이용한 생산 설비에서 발생하는 극저주파 자기장에도 노출될 수 있는데, WHO 산하 국제암연구소(IARC)에서는 라디오파와 극저주파 자기장에 대해서 “동물실험에서 암에 대한 증거가 있음(2B)”으로 분류한다. LCD 제조 산업에서 정전기 제거 목적으로 사용하는 이오나이저에서 발생하는 엑스선에 노출될 수 있는데, 노출량은 설치 대수에

따라 달라질 수 있다.

(3) 기계 및 전기적 위험

포토 공정에서 사용되는 리소그래피 장비는 고속으로 회전하거나 움직이는 부품이 많아 끼임, 절단 등의 기계적 위험이 있다. 또한 자동화된 고도의 정밀기계가 사용되며, 장비 오작동이나 정비 작업 중 장비의 예기치 않은 움직임, 기계적 결함으로 인한 부상의 위험과 끼임, 절단, 찢림 등의 기계적 위험이 있다.

전자산업 공정에서는 정전기 방전(electro static discharge, ESD)으로 인해 민감한 회로가 손상될 수 있으며, 작업자는 전기적 충격을 받을 수 있다. 또한, 고전압으로 작동하는 장비가 많아 누전이나 감전의 위험이 있다.

기타 안전상 위험 요인으로는 수지, 감광성 물질 등이 바닥에 흘렀을 경우 정비 작업 중 미끄러짐, 배관과 부품 등 운반 시 넘어짐, 설비와 기기 정비 작업 시 사다리 작업으로 인한 떨어짐 위험이 발생할 수 있다.

(4) 인간공학적 위험

반도체 제조 라인에서는 작업이 세밀하고 반복적인 자세를 취할 경우가 많아 작업자에게 근골격계질환 발

생 위험이 커진다. 특히 고정된 자세로 장시간 작업할 때 허리, 목, 어깨 등에 부담이 가해져 작업자의 건강에 영향을 줄 수 있다.

(5) 기타 환경적 위험

포토 공정은 미세한 입자가 매우 민감하기 작용하기 때문에 클린룸에서 작업한다. 이로 인해 작업자는 공기 질 관리와 같은 엄격한 청정환경에서 일하게 되는데, 이때 낮은 습도나 온도가 작업자의 건강에 영향을 줄 수 있다. 그리고 화학물질을 포함한 폐기물 처리가 적절하지 않으면 환경오염을 초래할 수 있으며, 이는 지역 사회와 생태계에 악영향을 미칠 수 있다.

3. 포토 공정 설비 정비 작업 안전보건 가이드 종합

반도체 제조 산업의 포토 공정 설비 정비 작업 중에는 화학물질 노출, 폭발, 질식, 직업병 발생 등 잠재적 사고 위험이 있다. 포토 공정 설비 정비 작업을 안전하게 마치기 위해서는 안전한 작업 절차를 따라야 한다. 다른 공정 설비 정비 작업과 마찬가지로 포토 공정 설비를 정비할 때 정비 작업 전, 작업 중, 작업 후 취해야 할 주요 안전보건 조치 사항들을 정리하였다(Table 3~5). 정비 작업 중 사용해야 할 위험한 기계, 기구의

Table 3. Key occupational safety and health precautions for maintenance work at photolithography process facilities in the semiconductor industry

OSH Items	Surface processing	PR coating	Baking	Exposure	Developing
Obtain permits for process equipment maintenance work in accordance with company regulations.	Always required	Always required	Always required	Always required	Always required
Electrically lock out and tag out process equipment, chemical piping, etc.	Always required	Always required	Always required	Always required	Always required
Isolate the process maintenance work area from the surrounding area, mark the maintenance area, and restrict access.	Always required	Always required	Always required	Always required	Always required
If the work requires the use of hazardous equipment, such as a crane, designate and post an operator and signaling personnel.	Take action if needed	Take action if needed	Take action if needed	Always required	Always required
Check the performance of safety and health facilities (photo and cleaning facilities, exhaust systems, etc.) and personal protective equipment required for maintenance work and emergencies.	Always required	Always required	Always required	Always required	Always required
Receive training on how to perform maintenance safely and identify emergency actions to take in the event of an accident.	Take action if needed	Always required	Always required	Always required	Always required
Wear the necessary personal protective equipment for maintenance work.	Always required	Always required	Always required	Always required	Always required

Table 4. Key OSH precautions for maintenance work at photolithography process facilities in the semiconductor industry

OSH Items	Surface processing	PR coating	Baking	Exposure	Developing
Place a coworker or supervisor near the maintenance work area to monitor operations and take action in case of an emergency.	Always required	Always required	Always required	Always required	Always required
Ensure that the maintenance workers can contact the worker supervising the maintenance work.	Take action if needed	Always required	Always required	Always required	Always required
Perform maintenance and cleaning operations safely, such as replacing, attaching, cleaning, and calibrating machines, equipment, materials, and sensors in the facility.	Always required	Always required	Always required	Always required	Always required

Table 5. Major OSH items taken after performing maintenance work for photolithography process facilities

OSH Items	Surface processing	PR coating	Baking	Exposure	Developing
Prompt disposal: categorize and store waste from maintenance work based on its characteristics.	Take action if needed				
After completing maintenance work, conduct safety checks with relevant departments to ensure the processes maintained are in optimal condition.	Take action if needed	Always required	Always required	Always required	Always required
Document key OSH-related details of each maintenance task.	Take action if needed	Always required	Always required	Always required	Always required
Regular exposure assessment to hazards for maintenance workers.	Always required				
Specialized medical exams for maintenance workers.	Always required	Always required	Take action if needed	Always required	Always required

종류와 신호수 배치 여부 등은 유지보수, 청소, 이동 또는 해체하는 부품의 크기에 따라 상당 부분 달라진다. 예를 들어 노광 장비와 같이 큰 기계나 설비를 해체하고 운반할 경우에는 크레인을 사용하고, 이에 따른 안전보건 조치(운전자 자격 점검, 신호수 배치, 정격 용량 점검, 크레인 점검, 작업 경계 출입 제한과 범위 지정, 비상시 조치 등)를 취한다. 자세한 안전보건 위험은 부록인 안전보건 가이드 전문에 제시하였다. 포토 공정의 단위공정에 대한 구체적인 정비 작업 가이드는 정비 대상 단위공정 장비와 작업 방법 등에 따라 신규로 개발하는 편이 바람직하다.

IV. 고찰과 결론

본 연구를 통해 포토 공정의 정비 작업 중 발생할 수 있는 주요 안전보건 위험 요소를 분석하고, 이를 기반

으로 체계적인 안전보건 가이드를 개발하였다. 특히, 화학물질의 관리와 장비 안전보건 조치에 대한 구체적인 방안이 작업자 안전보건에 미치는 영향이 크다는 점을 확인할 수 있었다.

포토 공정의 정비 작업에서 작업자의 안전과 건강을 보장하기 위해서는 체계적이고 실질적인 안전보건 가이드 제정이 필수적이다. 본 연구에서 제안한 가이드는 이러한 요구를 충족하기 위한 첫걸음으로, 향후 지속적인 업데이트와 개선을 통해 더욱 발전시켜야 할 것이다.

본 연구에서는 반도체 포토 공정에서 설비 정비 작업을 할 때 발생하는 일반적인 유해·위험 요인 노출을 제거, 차단, 억제, 관리(control)하는 안전보건 가이드를 개발하였다. 이는 전자산업 클린룸은 물론 일반 시설 정비 작업에서도 참조할 수 있는 표준이다. 본 가이드는 기업의 공정 종류, 작업 특성, 작업환경 등에 따라 일부 수정, 추가, 요약하여 안전보건 지침, 안전보건 교

육, 현장 게시 등 다양한 목적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 안전보건 가이드를 작성하는 데 참조한 공정 원리와 단위공정별 안전보건 위험에 대해 고찰한 주요 내용은 다음과 같다.

포토 공정에 앞서, 실리콘 산화막이 코팅된 웨이퍼 표면은 친수성으로 접착력이 떨어지기 때문에 접착력을 높이기 위해 소수성 표면으로 만들어 주는데, 이때 헥사메틸디실라잔을 사용한다. 공정 간 필요에 따라 웨이퍼의 표면을 깨끗하게 세정하여 불순물을 제거하기 위해 화학물질을 사용하는 과정에서 작업자가 화학물질에 노출될 위험이 있다. 그리고 웨이퍼 표면에 감광성 물질인 포토레지스트를 균일하게 도포(coating)하는 과정에서 휘발성유기화합물이 나올 수 있다. 또한 노광(exposure) 공정에서는 자외선이나 극자외선 등의 빛을 사용하여 포토레지스트에 패턴을 색인하는 데 노광 장비가 사용되는데, 이때 작업자가 강한 빛과 열에 노출될 위험이 있다. 노광된 포토레지스트를 현상액에 노출시켜 노광된 부분과 노광되지 않은 부분을 분리하는 현상(developing) 공정에서도 TMAH 등과 같은 화학물질을 사용하므로 작업자가 흡입 시 독성 또는 화상의 위험이 있다(Su et al., 2002; Wu et al., 2008).

포토 공정 장비의 정비 작업 중에는 다양한 유해·위험 요인이 존재할 수 있다. 이를 공정 원리에 근거하여 분석하면 다음과 같다.

첫째, 연구 결과에서 언급한 바와 같이, 포토 공정에서 사용하는 포토레지스트, 현상액, 세정액 등은 휘발성유기화합물과 부식성 화학물질을 포함하고 있다. 정비 작업에서 화학물질 노출과 관련하여 안전보건 위험을 평가한 문헌은 드문 편이다(NIOSH, 2024). 정비 작업 중 이러한 화학물질에 노출될 경우 피부 흡수, 흡입독성, 화상 등의 위험이 존재한다(KOSHA, 2012). 정비 작업 시 발생할 수 있는 화학물질 취급 지역에는 환기 시스템을 설치하거나 이동식 배기 장치를 배치하여 휘발성물질의 농도를 낮춘다. 휘발성유기화합물이나 유해가스가 누출될 경우 신속하게 환기장치를 가동하여 작업장 내 공기를 정화한다(Sherer et al., 2005). 그리고 모든 정비 작업자는 화학물질 취급 시 개인보호장비(PPE)를 착용하며, 화학물질이 누출되었을 경우 즉시 응급조치를 취하고, 사고 발생 보고 절차를 준수한다(EU-OSHA, 2012; HSA, 2024).

둘째, 정비 작업 중에는 기계, 장비와의 접촉으로 인한 끼임, 절단, 기계적 충격 등이 발생할 수 있다. 또한,

노광 장비에서 발생하는 고강도 자외선 광원이나 오븐 등 고열에 대한 안전보건 조치가 미흡할 경우 화상 위험이 존재한다. 이와 같은 위험을 예방하기 위해서는 정비 작업 전 장비의 전원을 차단하고, 잠금과 태그아웃(lockout/tagout) 절차를 반드시 준수하며, 장비에서 열이 나는 경우 작업자가 접촉하지 않도록 보호장치를 설치하고, 필요한 경우 온도가 적정 수준에 도달할 때까지 작업을 멈출 필요가 있다(Park DU et al., 2024).

셋째, 포토 공정 장비는 고전압이 필요한 경우가 많으며, 정비 작업 중 전기적 위험에 노출될 가능성이 크다. 전기적 쇼크나 감전의 위험이 있으므로, 장비를 정비하기 전에 전원을 반드시 차단한다. 전기작업 중에는 절연 장비를 사용하고, 적절한 절차에 따라 감전 사고를 방지한다. 또한, 모든 전기 관련 작업은 숙련된 전기 기술자가 수행하도록 하며, 정비 작업 중에는 고전압 경고 표시를 명확하게 표시한다. 좀 더 구체적인 사항은 KOSHA Guide의 「전기작업에 대한 기술지침」을 참조하여 이행한다(KOSHA, 2012).

마지막으로, 정비 작업 중에 발생할 수 있는 기타 일반적인 환경과 인간공학적 위험이 있다. 여러 생산설비와 장비의 세척, 청소, 부품 교체, 그 밖의 정비와 보수 작업 중에 위에 언급한 화학물질과 잔류물, 세척액, 폐액 등에 노출될 수 있다. 그리고 정비 대상 설비의 뚜껑, 커버 등 중량물을 취급하는 작업으로 인해 근골격계질환이나 부상이 발생할 수 있다(Williams, 1995). 또한, 공정 중 발생하는 휘발성유기화합물과 플라즈마로 인한 오존이 실내 공기 중에 축적될 수 있으며, 이는 작업자의 호흡기 건강에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 포토 공정 내 정비구역의 공기질을 정기적으로 모니터링하고, 필요한 경우 개인보호장비를 착용할 것을 권장한다(Kim KW et al., 2016).

포토 공정은 고도의 정밀성을 요구하는 첨단 공정인 만큼 다양한 화학적, 물리적, 기계적, 환경적 위험을 동반한다. 이를 예방하기 위해서는 정기적인 장비 유지보수, 작업환경 청정도 유지, 화학물질의 안전한 취급 요령 교육, 작업자의 개인보호장비 사용 등이 준수되어야 할 것이다. 특히, 정비 작업을 수행하는 모든 작업자는 정기적인 안전교육을 받고, 위험성평가를 통해 새로운 유해·위험 요인이나 안전보건 대책에 대해 지속적으로 학습하며, 사고 발생 시 보고와 대응 절차에 대한 교육

을 강화하여 사고가 발생했을 때 신속하고 정확하게 대처할 수 있도록 한다(HSE, 2024).

본 가이드는 포토 공정 정비 작업의 안전보건에 대한 실질적인 대책을 제시함으로써 산업 현장에서의 안전성을 높이는 데 기여할 것이다. 또한 본 가이드는 반도체의 다른 공정 설비 정비 작업에도 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- EU-OSHA. E-facts 66: maintenance and hazardous substances. 2012 [cited 2024 Oct]. Available from: <https://osha.europa.eu/sites/default/files/66-maintenance-hazaedous-substances.pdf>
- HSA. Maintenance fact sheet: KSOH; 2024 [Available from: https://www.hsa.ie/eng/vehicles_at_work/workplace_transport_safety/managing_workplace_priority_risks/maintenance.pdf]
- HSE. Managing risks and risk assessment at work: Health and Safety Executive; 2024 [cited 2023 11 09]. Available from: <https://www.hse.gov.uk/simple-health-safety/risk/risk-assessment-template-and-examples.htm>
- Huang SZ, Wu KY. Health risk assessment of photoresists used in an optoelectronic semiconductor factory. *Risk Anal.* 2019 Dec;39(12): 2625-2639
- Kim S, Lee S, Park J, Han TH, Moon JJ et al. Development of a general OSH guide for maintenance work at electronic Industry process facilities. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2024; 34(1):in press
- Kim KW, Chung EK, Park SH, Kim JB, Park HD et al. Characteristics of worker's exposure to hazardous agents in LCD panel manufacturing processes. Research results report of OSHRI 2016-OSHRI-770, 2016
- KOSHA Occupational Safety and Health Research Institute. Development of guidance for work environment management in the semiconductor industry. Research results report of OSHRI 2012-OSHRI-96, 2012
- KOSHA. Technical instructions for electrical work. KOSHA GUIDE(E-7-2012), 2012.
- Lee S, Kim S, Zoh KE, Whang Y, Lee KH et al. Development of an OSH guide for safely cleaning contaminated machinery, equipment, and parts used in the electronics manufacturing process. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2023;33(4): 419-26. Available from: <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2023.33.4.419>
- Lin CC, Yang CC, Ger J, Deng JF, Hung DZ. Tetramethylammonium hydroxide poisoning. *Clin Toxicol* 2010; 48: 213-217
- Misra A, Hogan JD, Chorush RA. Handbook of chemicals and gases for the semiconductor industry. New York: 2002
- Muylaert K, Eeckelaert L, Brueck C, Lafrenz B, Jachowicz M et al. Safe maintenance in practice: Office for Official Publications of the European Communities; 2010
- NIOSH. NIOSH Pocket guide to chemical hazards. 2024 [Internet] Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/default.html>
- OSHA. Device Fabrication 2024a. Available from: <https://www.osha.gov/semiconductors/silicon/device-fabrication>
- OSHA. Semiconductors 2024b [cited 2024 Oct]. Available from: <https://www.osha.gov/semiconductors/standards>
- OSHA. Semiconductors 2024b [cited 2024 Oct]. Available from: <https://www.osha.gov/semiconductors/hazards-solutions>
- Park DU, Byun HJ, Choi SJ, Jeong JY, Yoon CS et al. Review on potential risk factors in wafer fabrication process of semiconductor industry. *Korean J Occup Environ Med,* 2011;23(3):333-342
- Park DU, Zoh KE, Chung EK, Koh DH, Lee KH et al. Assessment of occupational health risks for maintenance work in fabrication facilities: brief review and recommendations. *Safety Health Work* 2024;15:87-95
- Park SH, Shin JA, Park HD. Exposure possibility to by-products during the processes of semiconductor manufacture. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2012; 22:52-59
- Safety Culture. Breakdown maintenance 2024 [cited 2024 Oct]. Available from: <https://safetyculture.com/topics/breakdown-maintenance>
- SEMI. Environmental, health, and safety guideline for semiconductor manufacturing equipment. SEMI S2-0310e, 2012
- SEMI. SEMI International Standards 2024 [cited 2024 Oct]. Available from: <https://semi.org/ko/productservices/standards>
- Sherer JM. Semiconductor industry: Wafer fab exhaust management. Florida: Boca Raton; 2005
- SKhynix news room 2024 [Available from: <https://>]

news.skhyunix.co.kr/post/the-bottom-part-of-the-photo-process

Su WY, Sjoberg SL, Crawford WC. inventors; Huntsman Petrochemical Co., assignee. Semiconductor developing agent. United States Patent US 6, 340, 559. 2002 Jan 22

Williams ME and Baldwin DG. Semiconductor industrial hygiene handbook: Monitoring, ventilation, equipment and ergonomics. New Jersey: Park Ridge; 1995

Wu CL, Su SB, Chen JL, Lin HJ, Guo HR. Mortality from dermal exposure to tetramethylammonium hydroxide. J Occup health 2008; 50:99~102

<저자정보>

박동욱(교수), 정은교(교수), 권세영(차장), 이규승(TL), 한택현(Senior Professional)