JESK J Ergon Soc Korea 2022; 41(4): 303-315
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2022.41.4.303
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Analysis of Research Trends on Hazardous Risk Factors in the Semiconductor Manufacturing Industry: A Systematic Literature Review

Seung Ho Lee[1], Byung Yong Jeong[1], Ji Young Park[2]

[1]Hansung University, Department of Industrial and Management Engineering, Seoul, 02876
[2]Ministry of Health and Welfare National Rehabilitation Center Rehabilitation Research Institute, Seoul, 01022

체계적 문헌 고찰을 통한 반도체 제조업의 유해 위험요인 연구 경향 분석

이승호[1], 정병용[1], 박지영[2]

[1]한성대학교 산업경영공학과
[2]보건복지부 국립재활원 재활연구소

Corresponding Author
Ji Young Park
Ministry of Health and Welfare National Rehabilitation Center Rehabilitation Research Institute, Seoul, 01022
Email : jypark0619@korea.kr

Received : June 27, 2022
Revised : July 19, 2022
Accepted : July 29, 2022

Copyright@2022 by Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

Objective: This study analyzes the trends of studies on hazardous risk factors for the semiconductor manufacturing industry through a systematic literature review.

Background: In previous studies, there was no systematic literature review on the research trend of hazardous risk factors in the semiconductor manufacturing industry.

Method: The databases of Web of Science, PubMed, RISS, Koreamed, NDSL, and Kmbase were searched from January 1, 2010, to June 6, 2021.

Results: Among 243 papers, 27 related papers were extracted and organized into categories such as gender, ergonomics, disease, and chemistry.

Conclusion: Research trends on hazardous risk factors in the semiconductor manufacturing industry were analyzed and implications were analyzed.

Application: The results might be of help to identify the typical risk factors in the semiconductor manufacturing industry and create a safe workplace where workers can work safely and healthily.

Keywords: Semiconductor, Systematic review, Ergonomic, Risk

1. Introduction

반도체 산업은 1960년대에 시작되었으며(Flamm and Reiss, 1993), 한국은 1970년대에 반도체 산업의 기반을 구축했다(Kim et al., 2015). 한국에서 반도체 산업에 종사하는 인원은 2019년 기준 133,058명이고, 남자는 92,045명(69%), 여자는 41,013명(31%)이다(Statistics Korea, 2021).

반도체 제조업은 전자집적회로, 다이오드, 트랜지스터 및 유사 반도체 소자와 이들의 부분품을 제조하는 산업활동을 말한다(Statistics Korea, 2017). 또한, 인공지능(AI), 사물인터넷(IoT), 빅 데이터(Big Data) 등 첨단혁신기술 구현에 필수적으로 수반되는 반도체는 고부가가치 창출을 통해 국가경쟁력 제고의 핵심 부품 산업이다(Kim and Seo, 2021).

반도체는 다양한 생산 공정을 통해 제조되며, 각각의 공정에서는 독성이나 반응성이 높은 물질을 비롯하여 여러 종류의 화학물질이 사용되고 있다(Park, 2012). 반도체 제조업에서는 알려진 발암물질 다수를 포함한 많은 화학물질이 사용되어왔는데, 산 염기류, 다양한 종류의 유기용제와 함께 전리방사선과 자기장 등의 위험요인이 존재해 왔다(Kim et al., 2019). 반도체 제조 공정에서는 수많은 화학물질과 에너지를 집중적으로 사용하기 때문에 근로자들이 화학적, 물리적 유해인자에 노출되는 것이 일반적이다(Park et al., 2011).

안전보건공단에서 실시한 10년간(2009년~2019년)의 역학조사에 따르면 반도체 제조업 근로자의 암 발생 위험은 남성이 일반국민 대비 1.16배, 전체 근로자에 대비 1.21배 높았고, 여성은 일반국민 대비 1.09배, 전체 근로자 대비 1.05배 높은 것으로 나타났다(Kim et al., 2019).

반도체 산업 기술은 빠르게 변화하고 있으며, 공정에 사용되는 유해물질은 자주 변화하고 있다(Kong, 2012). 화학제품의 제조자 또는 공급자는 여러 가지 이유를 들어 영업비밀 물질 표시를 해놓고 있지만 사용자(화학제품 구매자, 산업보건담당자, 또는 작업자) 입장에서는 영업비밀 물질에 대한 정보가 제한된다면 아무리 화학물질 관리를 잘하고자 해도 취약할 수 밖에 없다(Yoon, 2016). 이로 인해 반도체 제조에서 사용하고 있는 화학물질에 대한 공개가 완전히 이루어 지지 않아, 근로자에게 어떠한 위험이 있는지 조사하기 어려운 실정이다.

소수의 논문이 반도체 제조업과 유해요인 사이의 역학 검토를 다루고 있었고, 현재까지 연구 경향에 대하여 분석한 논문은 거의 찾아 볼 수 없었다. 따라서 본 연구는 체계적 문헌고찰 방법을 활용하여 반도체 제조업에서 도출된 유해 위험요인과 관련된 문헌을 분석하여, 현재까지의 연구 경향을 분석하고, 시사점을 찾아 향후 연구 방향을 제시함을 목표로 하였다.

2. Materials and Method

2.1 Search strategy

본 연구는 체계적 문헌고찰 보고 지침(PRISMA; Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)을 따른다. 분석 대상 문헌의 검색 기간은 2010년 1월 1일부터 2021년 6월 6일까지이며, Web of Science, PubMed, RISS, Koreamed, NDSL, Kmbase의 데이터베이스를 사용하였다. PICO (Participants, Interventions, Comparison, Outcome) 기준의 조합을 사용하여 검색식을((hazard* OR risk* OR toxic OR chemical* OR radiation* OR worker*) AND semiconductor* AND (produc* OR indust* OR manufact* OR fab*))로 사용하였다.

2.2 Selection criteria

문헌 중 반도체 제조업에서 사용되는 위험물질을 대상으로 한 문헌, 근로자 건강에 미치는 위험성에 대한 문헌 그리고 질병과 관련된 문헌을 포함하였다. 문헌 배제 기준은 반도체 제조 기술과 관련된 문헌, 초록만 제시하거나 미 출간된 문헌, 영어로 출간되지 않은 문헌, 체계적 문헌 고찰 및 역학 검토 문헌으로 하였다.

3. Results

Figure 1에 체계적 문헌고찰을 위한 본 연구의 문헌선택 진행 상황을 제시하였다. 검색 전략에 따른 데이터베이스 검색을 통해 총 243편의 문헌이 검색이 되었고, 중복된 38편의 문헌을 1차적으로 배제하였으며, 문헌 제목과 초록 검토를 통해 연구 목적과 관련이 없는 158편을 제외하였다. 2차적으로 영어로 출간되지 않은 문헌(3편), 초록만 제시되거나 미 출간된 문헌(9편), 기타 연구 목적과 관련되지 않은 문헌(3편), 역학적 검토 문헌(4편) 그리고 체계적 문헌고찰(1편)을 배제하여, 총 27편의 문헌을 선정하였다.

선정된 27편의 문헌을 각각 성별, 인간공학, 질병, 화학물질, 기타의 카테고리로 분류하여 평가방법, 유해요인 등으로 요약하였다.

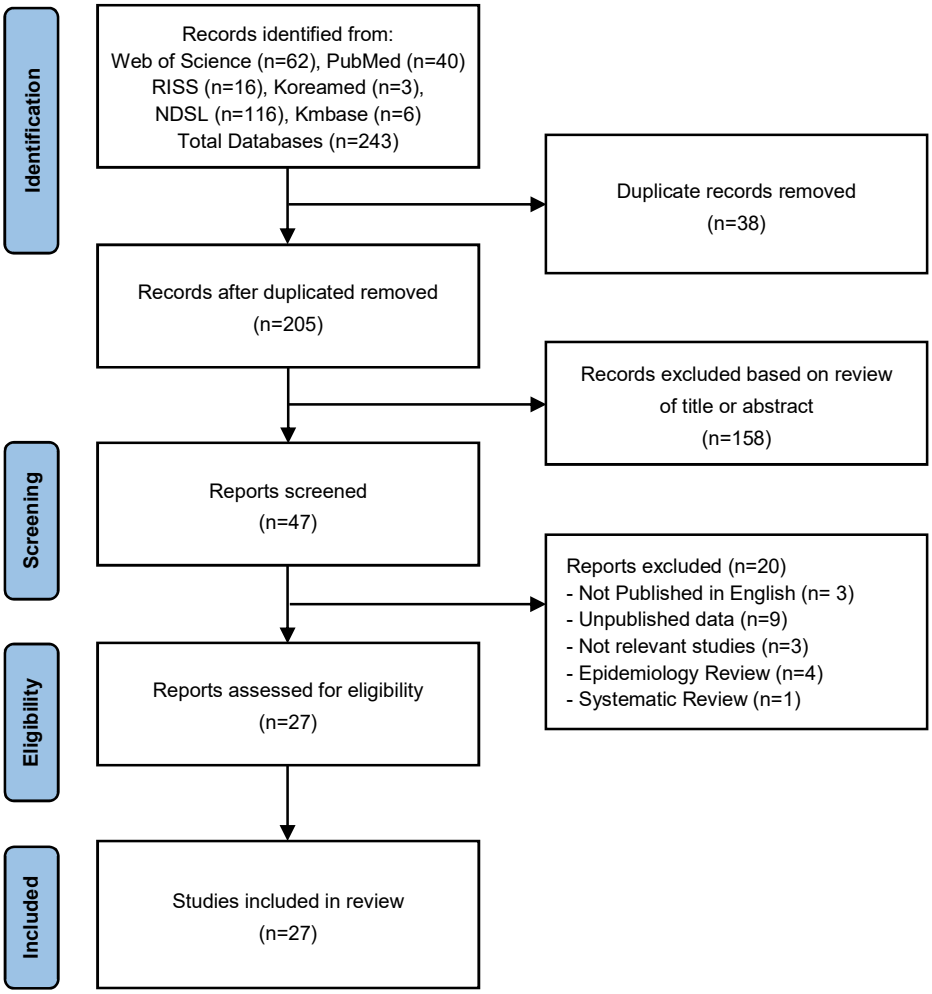

Figure 1. Progression on the selection of studies for the systematic review

3.1 Gender

Table 1은 '성별' 요인에 대하여 연구된 문헌으로 저자(출간연도), 출판국가, 성별, 연구방법, 질병으로 분류하고 요약하였다. 국가별로는 대만 2편, 스코틀랜드 1편, 한국 1편으로 분류되었다. 여성과 관련된 연구를 살펴보면 유산, 출산 시 영아의 몸무게에 대한 연구가 있었으며, 유방암, 폐암, 위암 등에 대하여 연구되었다. 남성에 대한 연구는 뇌암, 산화 스트레스가 있었다. 분류된 연구는 코호트 연구, 설문, 생물학적 샘플링 방법으로 진행되었다.

스코트랜드에서 실시한 Darnton et al. (2012)에 대한 연구를 제외한 모든 연구의 결론은 반도체 제조업에 유해 위험요인이 유의미한 영향을 미친다고 나타났다. 이 연구에 따르면 여성의 유방암, 폐암 및 위암과 남성의 뇌암은 반도체 제조 공정에서 사망률이나 암 발생률에 유의미한 결과는 없는 것으로 나타났다(Darnton et al., 2012).

Table 1. A systematic literature review by gender

Author (Year)	Publish country	Gender	Method	Disease
Lin et al. (2011)	Taiwan	Female	Cohort studies	Childbearing and birth weight
Darnton et al. (2012)	Scotland	Female Male	Cohort studies	Breast cancer, lung, stomach cancer Brain cancer
Kim et al. (2017)	Korea	Female	Questionnaire survey	Abortion
Pan et al. (2020)	Taiwan	Male	Biological sampling	Oxidative stress

3.2 Ergonomic risks

Table 2는 '인간공학적 위험성'에 따른 문헌으로 저자(출간연도), 국가, 인간공학적 위험성, 연구방법, 작업 공정으로 분류하고 요약하였다. 국가별로 대만 3편, 이란 1편으로 총 4편의 문헌이 추출되었으며, 근골격계 장애, 업무 관련 피로, 업무 스트레스와 감성지능의 인간공학적 위험성에 대하여 연구되었다. 연구방법으로는 센서스, 설문과 체크리스트가 사용되었다. 근골격계 장애는 조립과 운반 관련 공정에서 나타났고, 업무 관련 피로, 업무 스트레스와 감성지능 관련 연구는 주로 제조 공정에서 나타났다.

4편의 문헌에서 제시된 인간공학적 위험에 대한 연구 결과는 모두 유의미한 것으로 나타났다. 인간공학적 개입이 근골격계 질환을 감소시킬 수 있으며(Aghilinejad et al., 2016), 주야간 교대근무, 남성의 업무 적응 및 교육 수준, 여성의 국내 요인(기혼, 동거, 양육) 등은 반도체 제조 종사자의 업무상 피로에 영향을 미칠 수 있다고 하였다(Lin et al., 2015). 또한, OSHA MSDs 체크리스트가 근골격계 불편감을 조기에 식별할 수 있고(Lin et al., 2012), 감성지능이 업무 스트레스에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다(Chang and Chang, 2010).

Table 2. Systematic literature review by ergonomic risks

Author (Year)	Publish country	Ergonomic risk	Method	Work process
Aghilinejad et al. (2016)	Iran	Musculoskeletal disorders	Census method	Electronic circuits assembly
Lin et al. (2015)	Taiwan	Work-related fatigue	Questionnaires and health checkup results	Fabrication
Lin et al. (2012)	Taiwan	Musculoskeletal disorders	OSHA MSDs checklist	Carrying, transporting, and loading
Chang and Chang (2010)	Taiwan	Work stress and emotional intelligence	Questionnaire survey	Fabrication

3.3 Diseases

Table 3은 반도체 제조업에서 발생하는 '질병'과 관련된 문헌을 저자(출간연도), 국가, 질병, 연구방법, 작업 공정으로 분류하고 요약하였다. 국가별로 한국 1편, 미국 3편으로 분류되었다. 반도체 제조업에서 관련된 질병으로는 림프조혈암, 백혈병, 비호지킨 림프종, 혈액암, 암, 뇌 및 중추신경계 암 등으로 다양하게 나타났다. 연구방법은 정량적 위험성 평가와 인터뷰와 통계 분석, 코호트 분석으로 나타났다. 대부분의 연구에서는 질병과 화학물질 간의 연관성이 부족하다고 제시되었으며, Jones et al. (2015)의 연구에 따르면 림프조혈계 발암물질에 대한 노출과 근로자의 암 발병 사이의 연관성은 입증될 수 없다고 하였다. 또한, Kim et al. (2012)의 연구에 따르면

반도체 산업에서의 화학물질 노출과 백혈병 또는 비호지킨 림프종 사이의 인과 관계에 유의미한 상관관계는 없다고 하였다. 그러나 Rodrigues et al. (2020)의 연구에서는 중추신경계 암과 반도체 제조 산업에서 사용하는 화학물질 사이에 긍정적인 연관성이 있다고 하였다.

Table 3. Systematic literature review by diseases

Author (Year)	Publish country	Disease	Method	Work process
Jones et al. (2015)	US	Lymphohematopoietic Cancers	Reconstructed the potential exposures	Wafer fabrication
Kim et al. (2012)	Korea	Leukemia, Non-Hodgkin lymphoma	Interview and data analysis	Fabrication, etching and diffusion
Boice et al. (2010)	US	Cancer	Cohort studies	Wafer fabrication
Rodrigues et al. (2020)	US	Brain and central nervous system cancer	Cohort studies	Semiconductor and electronic module manufacturing

3.4 Chemicals

Table 4는 반도체 제조에서 사용되는 '화학물질'과 관련된 문헌을 저자(출간연도), 국가, 화학물질, 연구방법, 작업 공정으로 분류하고 요약하였다. 국가별로는 한국 7편, 미국 4편, 대만 1편, 중국 1편으로 총 13편의 문헌이 분류되었다. 반도체 제조에서 사용되는 화학물질은 테트라에틸 오르토실리케이트(TEOS), 오존(O3) 파우더, 황산, 크롬산, 산화에틸렌, 결정질 실리카, 이크롬산칼륨, 포름알데히드, 이소프로필 알코올(IPA), 카테콜, 나프탈렌, 아세톤, 삼불화염소(ClF3), 벤젠, 나노 입자(알루미나, 세리아, 비정질 실리카), 벤젠, 포레스트, 실리카, 규소, 염산 등으로 매우 다양하게 사용되고 있었으며, 또한 다수의 화학물질은 영업기밀로 인하여 알려지지 않은 채 사용되고 있었다. 작업 공정으로는 웨이퍼 제조, 웨이퍼 연마, 칩 조립, 화학 기상 증착, 회로 제작, 포토리소그래피, 포토레지스트, 클린룸 등으로 다양하게 나타났다. 분류된 문헌의 연구방법도 매우 다양하게 나타났는데, 빅 데이터 분석, 독성발현경로(AOP), 사례 연구, 물질안전보건자료(MSDS) 및 분석 결과, 규정 준수 기반 화학물질 노출 데이터, 마이크로 진공 및 와이프 샘플 수집, 노출 평가, 현장 평가/나노물질 노출 평가 기법(2.0), 전자 신호 및 분산 x-선 분광법, 전산유체역학(CFD), 코호트 연구 등이 있었다.

반도체 제조에서 사용되는 화학물질의 주요 190개 화학물질 중 41개 화학물질이 직업병에 대한 특정 바이오 마커와 연관이 있었고, 12개 mRNA 또는 단백질 바이오 마커가 유방암과 관련이 있는 것으로 밝혀졌다(Rim, 2021).

반도제 제조에서 사용하는 화학물질에는 영업비밀 성분이 포함되어 있다. 이러한 영업비밀 성분으로 인해 근로자를 화학물질로부터 보호하는 것이 어렵다(Yoon et al., 2020)고 하였으며, Kim et al. (2018)의 연구에서는 화학물질 공급업체와 화학물질 관리 정책을 공유하고 영업비밀 가능성이 있는 물질을 줄이기 위해 노력해야 한다고 하였다.

물질안전보건자료(MSDS)와 포토레지스트 제품의 화학성분과 그 부산물에 대해 비교한 Jang et al. (2019)의 연구에서는 포토레지스트 제품에 포함된 발암물질이 MSDS 독성정보에는 명시되지 않은 것으로 나타났다.

반도체 제조 공정에서 발생하는 주요 부산물인 비정질 SiO_2, TiO_2 및 As_2O_3 구형 입자는 아직 발암성, 돌연변이성 또는 생식 독성을 유발하지 않는 것으로 나타났다(Choi et al., 2015). 또한 Brenner et al. (2016b)의 연구 결과에 따르면 작업자가 나노 입자에 흡입 노출될 가능성은 희박하며, 현재 반도체에서 사용하는 금속 산화물의 공학 나노물질(engineered nanomaterials; ENM)에 특정한 직업적 노출 제한(occupational exposure limits; OELs)은 없었다고 하였다.

동일한 분석 방법으로 공기 중 나노 금속 산화물의 독성을 반도체 제조 공정과 폐수처리 시설로 분류해서 분석한 연구도 있었다 (Brenner et al., 2015; Brenner et al., 2016a).

Table 4. Systematic literature review by chemicals

Author (Year)	Publish country	Chemical materials	Method	Work process
Rim (2021)	Korea	Chemicals in semiconductor manufacturing	Adverse outcome pathway analysis	Wafer processing and chip assembly
Choi et al. (2013)	Korea	Tetraethyl orthosilicate and ozone	By-product powder analysis	Chemical Vapor Deposition
Yoon et al. (2020)	Korea	Sulfuric acid, chromic acid, ethylene oxide, crystalline silica, potassium dichromate, formaldehyde, etc. and trade secrets	Material safety data sheets analysis	Photolithography
Kim et al. (2018)	Korea	Sulfuric acid, catechol, and naphthalene, etc. and trade secrets	Material safety data sheets analysis	Photolithography
Choi et al. (2018)	Korea	Isopropyl alcohol and acetone and solvents	Evaluate the hazardous chemical exposure control system	Integral circuits on silicon wafers
Shepard and Brenner (2014)	US	Nanoparticles (alumina, ceria, amorphous silica)	Process review, workplace observations, and preliminary surface sampling	Circuit fabrication
Tsai (2011)	Taiwan	Chlorine trifluoride	Reviewing chlorine trifluoride	Wafer fabrication
Jang et al. (2019)	Korea	Benzene, formaldehyde	Comparison of photoresist products and their by-products and material safety data sheets	Photolithography process
Choi et al. (2015)	Korea	Amorphous SiO_2, TiO_2, and As_2O_3 spherical particles	Identifying of powder byproducts	Fabrication
Brenner et al. (2016b)	US	Silica, alumina	Nanomaterial exposure assessment technique (2.0)	Wafer polishing process
Brenner et al. (2015)	US	SiO_2, Al_2O_3, CeO_2	Air sampling analysis	Wastewater treatment
Brenner et al. (2016a)	US	SiO_2, Al_2O_3, CeO_2	Air sampling analysis	Wafer polishing process
Li and Zhou (2015)	China	HCl	Spread and prediction of escaped hydrochloric acid	Cleanroom metal-etching chamber

3.5 Other categories

Table 5는 앞에서 분류한 주제 이외의 문헌을 '기타'로 분류하였으며, 저자(출간연도), 국가, 연구 주제, 연구 결과로 나누어 요약하였다. 추출된 2편의 연구는 모두 미국에서 출간된 연구로 Shen et al. (2018)의 연구는 미국 내에 위치한 반도체 회사를 폐기물 관리

접근 방식 관점에서 다룬 최초의 연구이며, 미국 정부는 이 연구 결과를 지역 반도체 회사들의 화학 폐기물의 부정적인 영향을 줄이기 위한 정책을 채택하기 위해 참조할 수 있다고 하였다(Shen et al., 2018).

Speed et al. (2015)의 연구는 화학 기계적 평탄화(chemical mechanical planarization; CMP) 슬러리 및 관련 폐기물 흐름에 관한 연구로 공통 공학 나노 입자(engineered nanoparticles; ENP) 샘플 세트를 개발하고 폐기물 흐름을 특성화하기 위한 검증된 분석 방법을 개발하는 것을 주제로 하였다.

Table 5. Systematic literature review by other categories

Author (Year)	Publish country	Subject	Result
Shen et al. (2018)	US	Analysis of chemical waste management technology of semiconductor manufacturing companies	27 companies were classified in the "best performance" category for the waste management of two or more chemicals. 15 companies were classified in the worst performance categories.
Speed et al. (2015)	US	Develop a common set of ENP samples that used to develop validated analytical methods for characterizing CMP slurries	The ENPs and CMP slurries used in this study have been made available to a number of other research groups, and it is the intention of the consortium for this paper to provide a basis for characterizing and understanding human and environmental exposures for this important class of industrial ENPs.

4. Discussion and Conclusion

본 연구는 반도체 제조업과 관련된 위험성을 체계적 문헌 검토를 통해 연구 경향을 분석하였다.

총 243편의 문헌 중 27편의 문헌에 대하여 성별, 인간공학, 질병, 화학물질, 기타 주제로 분류하였다.

국가별로 보면 한국이 10편으로 문헌이 가장 많았고 미국 7편, 대만 7편 그리고 영국, 중국, 이란이 각각 1편 순으로 나타났다. 이러한 결과는 반도체 업체의 매출과 관련성을 찾아볼 수 있다. 2021년 2분기 기준으로 반도체 업체의 매출은 삼성(한국), Intel(미국), TSMC(대만), SK 하이닉스(한국), Micron(미국), Qualcomm(미국), Nvdia(미국), Broadcom(미국), MediaTek(대만), Texas Instruments(미국) 순으로 나타났다(The McClean Report, 2021).

성별을 주제로 한 문헌에서는 주로 출산과 관련된 여성에 대한 연구가 대부분이었다. 이는 반도체 제조업에서 여성 근로자를 중심으로 생식 독성 위험 및 암에 대한 예방 대책이 필요할 것으로 판단된다.

인간공학적 위험성으로 분류된 문헌에서는 근골격계 질환, 피로, 스트레스 등과 관련된 연구가 있었다. 반도체 제조업은 중공업에 비해서 부상이 적은 경공업에 속한다(LaDou and Bailar, 2007). 반도체 제조업의 생산라인은 대부분 자동화로 이루어져 있으나 유지보수 작업, 세정 작업, 공사성 작업, 중량물 작업 및 고소작업의 고위험 작업 그룹 등에서 작업자의 업무가 이루어지고 있다(Korea Occupational Safety and Health Agency, 2020). 추후 반도체 작업자의 안전한 업무 수행을 위하여 각 작업에서 발생 가능한 근골격계 질환, 피로, 스트레스, 인지오류 등의 인간공학적 위험 요인에 관련한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 기업에서는 인간공학적 접근을 통해 중대 재해를 예방하고, 지속적인 교육을 통해 안전문화를 정착하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

질병으로 분류된 문헌에서는 암과 관련된 것이 대부분이었으며, 백혈병, 림프종, 뇌종양, 혈액암 등이 있었다. 반도체 제조업이 암에 미치는 영향이 유의미하거나 유의미하지 않다는 결과가 모두 존재하고 있다. 반도체 제조에서 사용하는 화학물질의 일부는 영업비밀

로 공개되고 있지 않아 인과 관계를 설명하기에는 부족한 것으로 보이며, 추후 새롭게 알려지는 화학물질의 유해 위험 영향에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것이라고 판단된다.

화학물질로 분류된 문헌에서는 반도체 제조 공정에서 사용하는 화학물질의 노출과 근로자의 건강 사이의 영향 등을 주로 다루고 있었다. 수천 가지의 화학물질을 사용하는 반도체 제조업이 근로자의 건강에 미치는 영향을 규명하기에는 지속적으로 연구가 되어야 한다. 또한 영업비밀로 인해 연구의 한계가 있는 만큼, 반도체 제조 기업에서 적극적으로 사용하는 화학물질의 위험성을 분석하여 근로자의 건강과 안전을 보호하기 위해 노력해야 한다. 구체적으로, 사업주는 위험성 평가를 통해 재해 발생 가능성이 있는 유해·위험요소를 파악해 평가한 뒤 위험성을 제거 및 감소시키기 위한 개선 대책을 수립 실행할 수 있다(Oh, 2014). 그리고 화학 산업의 중대사고 예방을 위한 공정안전교육의 기여도가 크다(Swuste and Reniers, 2017; Mkpat et al., 2018)는 연구 결과로 보아 근로자에게 교육을 통해 화학물질의 위험성을 알리는 것은 중요하다고 판단된다.

마지막 기타로 분류된 문헌에서는 반도체 공정에서 발생하는 부산물, 화학 폐기물의 관리 기법, 물리적, 화학적 독성 특성에 관련된 것이었다. Shen et al. (2018)의 연구에서 보면 화학물질 폐기물의 배출량, 재활용율, 회수율 등으로 기업을 평가한 것을 볼 수 있다. 이러한 연구는 최근 기업에서 실시하고 있는 폐기물 매립 제로(Zero Waste To Landfill) 인증과 관계가 있음을 볼 수 있다. 폐기물 매립 제로 인증은 사업장에서 발생하는 폐기물을 자원으로 재활용하는 비율에 따라 등급을 부여하는 제도이다. 국내에서는 삼성전자의 반도체 사업장에서 발생하는 폐기물 총량 약 60만톤 중 59만톤 이상이 재활용되거나 열에너지로 회수되며, 평균 자원 순환율은 98.1%로 나타났다(Samsung, 2020).

체계적 문헌고찰과 역학 검토 관련된 문헌은 연구에서 제외하였는데, 그 중 1편은 체계적 문헌고찰과 메타 분석을 통해 반도체 작업과 자연 유산의 위험 간의 연관성을 평가하였다. Kim et al. (2019)의 연구에서 제조 작업자의 자연 유산 위험은 비제조 작업자보다 훨씬 높았으며, 포토리소그래피 작업자는 비제조 및 사무직 작업자보다 자연 유산 위험이 더 높게 나타났다.

그리고 역학 검토에 대한 문헌 4편이 있었는데, 건강, 질병, 화학물질의 주제를 다루고 있다.

Lee et al. (2015)의 연구에서는 전자업종의 근로자와 일반 근로자와의 혈액암 발병률을 통계적으로 비교하였으나 결과는 유의하지 않은 것으로 나타났다.

Park (2018)의 연구에서는 지금까지 웨이퍼 제조 작업자에 대한 암 위험 또는 사망률의 역학 연구에서 특정 발암물질에 대한 노출을 정량적 또는 반정량적으로 평가하지 않았음을 발견했으며, 여러 연구에서 수행한 것처럼 대략적인 수준에서 위험을 평가하면 노출을 잘못 분류하여 위험이 희석되고 실제로 존재하는 연관성을 감지할 수 없게 될 수 있다고 하였다.

미국에서 웨이퍼 제조에서 일하는 근로자 100,081명에 대한 화학 물질 노출평가를 실시하였으나, 98% 이상이 노출 한도 미만이었다(Marano et al., 2010).

그리고 Kim et al. (2014)의 연구에서는 자연 유산, 선천적 기형 및 생식 능력 감소의 원인이 화학물질로 의심이 되지만 가능성에 대한 정보는 아직 한계가 있으며, 암 위험의 증거는 모호하다고 하였다.

반도체 제조에서 사용하는 수백 가지의 화학물질은 영업비밀로 인해 정확하게 공개되고 있지 않다. 영업비밀을 외부에 노출시키는 것은 기업의 경쟁력을 떨어뜨리는 위험이 있기 때문에 쉽게 공개하기는 어렵다. 다만, 기업이 자체적으로 평가하여 위험성이 높은 물질에 대해 예방 대책을 정확하게 수립하여 실행한다면 암, 유산 등과 같은 질병의 발병율을 낮출 수 있을 것이라 기대된다. 그리고, 규제되지 않은 많은 화학물질의 사용으로 인해 반도체 산업에서 근로자의 건강 및 안전 문제를 해결하기 위해 보다 지속 가능한 정책과 방법을 찾아야 한다고 하였다(Kim et al., 2018).

본 연구는 반도체 산업의 위험성에 대한 연구 경향을 파악하였으나, 이것이 반도체 산업의 모든 위험을 나타내는 것은 아니다. 또한 본 연구에서 제시된 요인 외에 사업장의 물리적인 위험성 뿐만 아니라 근무 환경, 조직 만족도, 근로자의 정신적 스트레스 등 다양한

시각의 연구가 필요할 것으로 판단된다. 향후 본 연구가 반도체 산업의 대표적인 위험요소를 파악하고 근로자가 건강하고 안전하게 일할 수 있는 안전한 작업장을 조성하는데 도움이 되길 기대한다.

Acknowledgment

This research was financially supported by Hansung University.

References

Aghilinejad, M., Azar, N., Ghasemi, M., Dehghan, N. and Kabir, E., An ergonomic intervention to reduce musculoskeletal discomfort among electronic circuits assembly workers, *Work*, 54(2), 445-450, 2016. https://doi.org/10.3233/WOR-162325

Boice, J.D., Marano, D.E., Munro, H.M., Chadda, B.K., Signorello, L.B., Tarone, R.E., Blot, W.J. and McLaughlin, J.K., Cancer mortality among US workers employed in semiconductor wafer fabrication, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 52(11), 1082-1097, 2010. https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e3181f7e520

Brenner, S.A., Neu-Baker, N.M., Caglayan, C. and Zurbenko, I.G., Occupational Exposure to Airborne Nanomaterials: An Assessment of Worker Exposure to Aerosolized Metal Oxide Nanoparticles in Semiconductor Wastewater Treatment, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(7), 469-481, 2015. https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1018515

Brenner, S.A., Neu-Baker, N.M., Caglayan, C. and Zurbenko, I.G., Occupational exposure to airborne nanomaterials: An assessment of worker exposure to aerosolized metal oxide nanoparticles in a semiconductor fab and subfab, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(9), D138-D147, 2016a. https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1183012

Brenner, S.A., Neu-Baker, N.M., Eastlake, A.C., Beaucham, C.C. and Geraci, C.L., NIOSH field studies team assessment: Worker exposure to aerosolized metal oxide nanoparticles in a semiconductor fabrication facility, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(11), 871-880, 2016b. https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1183015

Chang, C.P. and Chang, F.J., Relationships among traditional Chinese personality traits, work stress, and emotional intelligence in workers in the semiconductor industry in Taiwan, *Quality & Quantity*, 44, 733-748, 2010. https://doi.org/10.1007/s11135-009-9235-x

Choi, K.M., An, H.C. and Kim, K.S., Identifying the Hazard Characteristics of Powder Byproducts Generated from Semiconductor Fabrication Processes, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(2), 114-122, 2015. https://doi.org/10.1080/15459624.2014.955178

Choi, K.M., Kim, T.H., Kim, K.S. and Kim, S.G., Hazard Identification of Powder Generated from a Chemical Vapor Deposition Process in the Semiconductor Manufacturing Industry, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 10(1), D1-D5, 2013. https://doi.org/10.1080/15459624.2012.734274

Choi, S., Yoon, C., Kim, S., Kim, W., Ha, K., Jeong, J., Kim, J., Shin, J. and Park, D., Comprehensive Evaluation of Hazardous Chemical Exposure Control System at a Semiconductor Manufacturing Company in South Korea, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(6), 1162, 2018. https://doi.org/10.3390/ijerph15061162

Darnton, A., Miller, B.G., MacCalman, L., Galea, K.S., Wilkinson, S., Cherrie, J.W., Shafrir, A., McElvenny, D. and Osman, J., An updated

investigation of cancer incidence and mortality at a Scottish semiconductor manufacturing facility with case-control and case-only studies of selected cancers, *Occupational and Environmental Medicine*, 69(10), 767-769, 2012. http://dx.doi.org/10.1136/oemed-2011-100606

Flamm, K. and Reiss, P.C., Semiconductor Dependency and Strategic Trade Policy, *Brookings Papers on Economic Activity. Microeconomics*, 1, 249-333, 1993. https://doi.org/10.2307/2534714

Jang, M.Y., Yoon, C.S., Park, J.H. and Kwon, O.H., Evaluation of Hazardous Chemicals with Material Safety Data Sheet and By-products of a Photoresist Used in the Semiconductor-Manufacturing Industry, *Safety and Health at Work*, 10(1), 114-121, 2019. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2018.08.001

Jones, R.M., Dell, L., Torres, C., Simmons, C.E., Poole, J., Boelter, F.W. and Harper, P., Exposure Reconstruction and Risk Analysis for Six Semiconductor Workers With Lymphohematopoietic Cancers, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 57(6), 649-658, 2015. https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000000413

Kim, E.A., Lee, S.H., Seo, H.G., Jeon, G.Y. and Park, S.U., Epidemiological survey of health conditions of semiconductor manufacturing process workers, *Occupational Safety and Health Research Institute*, 2019. https://bit.ly/3xdIEXp

Kim, E.Y. and Seo, C.B., A Comparative Analysis on Export Competitiveness of Semiconductor Industry between Korea and Related-Significant Countries, *The Journal of Asian Studies*, 24(4), 191-210, 2021. http://doi.org/10.21740/jas.2021.11.24.4.191

Kim, H., Kwon, H.J., Rhie, J., Lim, S., Kang, Y.D., Eom, S.Y., Lim, H., Myong, J.P. and Roh, S., The relationship between spontaneous abortion and female workers in the semiconductor industry, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 29(1), 49, 2017. https://doi.org/10.1186/s40557-017-0204-x

Kim, I., Kim, H.J., Lim, S.Y. and Kongyoo, J., Leukemia and non-Hodgkin lymphoma in semiconductor industry workers in Korea, *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 18(2), 147-153, 2012. https://doi.org/10.1179/1077352512Z.00000000019

Kim, K., Sung, H.K., Lee, K. and Park, S.K., Semiconductor Work and the Risk of Spontaneous Abortion: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(23), 4626, 2019. https://doi.org/10.3390/ijerph16234626

Kim, M.H., Kim, H. and Paek, D., The health impacts of semiconductor production: an epidemiologic review, *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 20(2), 95-114, 2014. https://doi.org/10.1179/2049396713Y.0000000050

Kim, S., Yoon, C., Ham, S., Park, J., Kwon, O., Park, D., Choi, S., Kim, S., Ha, K. and Kim, W., Chemical use in the semiconductor manufacturing industry, *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 24(3-4), 109-118, 2018. https://doi.org/10.1080/10773525.2018.1519957

Kim, S.Y., Baik, Y.J. and Park, Y.R., The historical review of the semiconductor industry, *The Review of Business History*, 30(3), 145-166, 2015. https://doi.org/10.22629/kabh.2015.30.3.006

Kong, J.O., Working Environment and Experiences of Diseases in Semiconductor Industry, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 22(1), 32-41, 2012. https://www.jksoeh.org/main/download.htm?code=J02201005

Korea Occupational Safety and Health Agency, Safety and health model for semiconductor and display industry workers, 2020. https://www.kosha.or.kr/kosha/business/HealthAndSafetyModel.do?mode=view&articleNo=419207&article.offset=0&articleLimit=10 (retrieved Feb 18, 2022).

LaDou, J. and Bailar, J.C., Cancer and reproductive risks in the semiconductor industry, *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 13(4), 376-385, 2007. https://doi.org/10.1179/oeh.2007.13.4.376

Lee, K., Kim, S.G. and Kim, D., Potential risk factors for haematological cancers in semiconductor workers, *Occupational Medicine*, 65(7), 585-589, 2015. https://doi.org/10.1093/occmed/kqv112

Li, J. and Zhou, Y.F., Occupational hazards control of hazardous substances in clean room of semiconductor manufacturing plant using CFD analysis, *Toxicology and Industrial Health*, 31(2), 123-139, 2015. https://doi.org/10.1177/0748233712469996

Lin, Y.C., Chen, M.H., Hsieh, C.J. and Chen, P.C., Effect of rotating shift work on childbearing and birth weight: a study of women working in a semiconductor manufacturing factory, *World Journal of Pediatrics*, 7(2), 129-135, 2011. https://doi.org/10.1007/s12519-011-0265-9

Lin, Y.C., Chen, Y.C., Hsieh, H.I. and Chen, P.C., Risk for Work-Related Fatigue Among the Employees on Semiconductor Manufacturing Lines, *Asia Pacific Journal of Public Health*, 27(2), NP1805-NP1818, 2015. https://doi.org/10.1177/1010539513490788

Lin, Y.H., Chen, C.Y. and Pan, Y.T., The Suitability for the Work-Related Musculoskeletal Disorders Checklist Assessment in the Semiconductor Industry: A Case Study, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 23(3), 222-229, 2012. https://doi.org/10.1002/hfm.20309

Marano, D.E., Boice, J.D., Munro, H.M., Chadda, B.K., Williams, M.E., McCarthy, C.M., Kivel, P.F., Blot, W.J. and McLaughlin, J.K., Exposure Assessment Among US Workers Employed in Semiconductor Wafer Fabrication, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 52(11), 1075-1081, 2010. https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e3181f6ee1d

Mkpat, E., Reniers, G. and Cozzani, V., Process safety education: a literature review, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54, 18-27, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.02.003

Oh, S.H., The Protection of Workers from Chemical in the Industrial Safety and Health Act - focused on 'Risk Assemssment', *The Journal of Labor Law*, 31, 345-376, 2014. https://www.earticle.net/Article/A233541

Pan, C.H., Lin, C.Y., Lai, C.H. and Jeng, H.A., Arsenic Exposure and Methylation Efficiency in Relation to Oxidative Stress in Semiconductor Workers, *Atmosphere*, 11(5), 464, 2020. https://doi.org/10.3390/atmos11050464

Park, D., Review for Retrospective Exposure Assessment Methods Used in Epidemiologic Cancer Risk Studies of Semiconductor Workers: Limitations and Recommendations, *Safety and Health at Work*, 9(3), 249-256, 2018. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2018.05.005

Park, D.U., Byun, H.J., Choi, S.J., Jeong, J.Y., Yoon, C.S., Kim, C.N., Ha, K.C. and Park, D.Y., Review on Potential Risk Factors in Wafer Fabrication Process of Semiconductor Industry, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 23(3), 333-342, 2011. https://doi.org/10.35371/kjoem.2011.23.3.333

Park, S.H., Chemical Substances with Exposure Possibility in Semiconductor Manufacturing Factories, *Journal of Korean Association of Occupational Health Nurses*, 19(2), 81-83, 2012.

Rim, K., Application of the adverse outcome pathway framework to predict the toxicity of chemicals in the semiconductor manufacturing industry, *Molecular & Cellular Toxicology*, 17, 325-345, 2021. https://doi.org/10.1007/s13273-021-00139-4

Rodrigues, E.G., Herrick, R.F., Stewart, J., Palacios, H., Laden, F., Clark, W. and Delzell, E., Case-control study of brain and other central nervous system cancer among workers at semiconductor and storage device manufacturing facilities, *Occupational and Environmental Medicine*, 77(4), 238-248, 2020. http://dx.doi.org/10.1136/oemed-2019-106120

Samsung, Samsung Receives Zero Waste to Landfill Validations for All its Global Semiconductor Manufacturing Sites, *Samsung Newsroom*, 2020. https://bit.ly/2MLJX7L

Shepard, M. and Brenner, S., Cutaneous exposure scenarios for engineered nanoparticles used in semiconductor fabrication: a preliminary investigation of workplace surface contamination, *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 20(3), 247-257, 2014. https://doi.org/10.1179/2049396714Y.0000000074

Shen, C.W., Tran, P.P. and Minh Ly, P.T., Chemical Waste Management in the U.S. Semiconductor Industry, *Sustainability*, 10(5), 1545, 2018. https://doi.org/10.3390/su10051545

Speed, D., Westerhoff, P., Sierra-Alvarez, R., Draper, R., Pantano, P., Aravamudhan, S., Chen, K.L., Hristovski, K., Herckes, P., Bi, X., Yang, Y., Zeng, C., Otero-Gonzalez, L., Mikoryak, C., Wilson, B.A., Kosaraju, K., Tarannum, M., Crawford, S., Yi, P., Liu, X., Babu, S.V., Moinpour, M., Ranville, J., Montano, M., Corredor, C., Posnerj, J. and Shadman, F., Physical, chemical, and in vitro toxicological characterization of nanoparticles in chemical mechanical planarization suspensions used in the semiconductor industry: towards environmental health and safety assessments, *Environmental Science: Nano*, 2, 227-244, 2015. https://doi.org/10.1039/C5EN00046G

Statistics Korea, Korean statistical information service (KOSIS). 2021. https://kosis.kr/index/index.do (retrieved Feb 18, 2022).

Statistics Korea, Korean standard industrial classification (KSIC). 2017. http://kssc.kostat.go.kr/ksscNew_web/ekssc/main/main.do# (retrieved Feb 18, 2022).

Swuste, P. and Reniers, G., Seveso inspections in the European low countries history, implementation and effectiveness of the European directives in Belgium and The Netherlands, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49(A), 68-77, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.11.006

The McClean Report, Samsung Passes Intel to Become World's Largest Semi Supplier in 2Q21, *Research Bulletin*, 2021. https://www.icinsights.com/data/articles/documents/1396.pdf

Tsai, W.T., Environmental and health risks of chlorine trifluoride (ClF3), an alternative to potent greenhouse gases in the semiconductor industry, *Journal of Hazardous Materials*, 190(1-3), 1-7, 2011. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.10.107

Yoon, C., Kim, S., Park, D., Choi, Y., Jo, J. and Lee, K., Chemical Use and Associated Health Concerns in the Semiconductor Manufacturing Industry, *Safety and Health at Work*, 11(4), 500-508, 2020. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2020.04.005

Yoon, C.S., Current Status of Chemical Substance Management in Korea 4 - Use and Management of Trade Secret Substances,

Korea Industrial Health Association, 341, 27-36, 2016. http://koreascience.kr/article/JAKO201664656419729.pdf

Author listings

Seung Ho Lee: blueoreo@gmail.com
Highest degree: MBA, Department of Business Administration(IMBA), The Graduate School Sungkyunkwan University
Position title: PhD student, Department of Industrial and Management Engineering, Hansung University
Areas of interest: Ergonomics, UI/UX, Safety and Health Management

Byung Yong Jeong: byjeong@hansung.ac.kr
Highest degree: PhD, Department of Industrial Engineering, KAIST
Position title: Professor, Department of Industrial and Management Engineering, Hansung University
Areas of interest: Ergonomics, Safety and Health Management, Universal Safety & Design

Ji Young Park: jypark0619@korea.kr
Highest degree: PhD, Department of Industrial Engineering, Dongguk University
Position title: Researcher, Ministry of Health and Welfare National Rehabilitation Center Rehabilitation Research Institute
Areas of interest: Ergonomics, Safety and Health Management, UI/UX, Service Design, Disability and Aging