



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

반도체 산업의 200mm와 300mm FAB의 작업환경 유해물질 노출 특성 비교

연세대학교 보건대학원
산업환경보건학과 산업보건전공
김 정 선

반도체 산업의 200mm와 300mm FAB의 작업환경 유해물질 노출 특성 비교

지도 윤진하 교수

논문을 보건학 석사학위 논문으로 제출함.

2025년 6월

연세대학교 보건대학원

산업환경보건학과 산업보건전공

김 정 선

김정선의 보건학 석사학위 논문을 인준함

심사위원 _____ 윤 진 하 _____ 인

심사위원 _____ 김 치 년 _____ 인

심사위원 _____ 윤 병 윤 _____ 인

연세대학교 보건대학원

2025년 6월

차 례

국문 요약	iv
I. 서론	1
1. 연구배경 및 필요성	1
2. 연구목적	5
II. 연구방법	6
1. 연구대상	6
2. 연구전략	7
3. 측정 및 분석방법	9
4. 윤리적 고려	12
III. 결과	12
1. 반도체 공정별 노출 평가	12
2. 직군별 노출 평가	16
3. Threshold Limit Value 별 노출 평가	28
4. 200mm 대비 300mm FAB의 유해물질 검출률 및 유의성 비교	20
IV. 고찰	27
V. 결론	30
참고문헌	32
부록	35
Abstract	43

List of tables

Table 1. Annual Number of Workplace Environment Measurements by FAB Type and (Sub)Process	10
Table 2. Comparative Analysis of Hazardous Substance Detection by Process and FAB Type	14
Table 3. Job-Based Comparison of Hazardous Substance Detection by FAB Type	17
Table 4. TLV-Based Comparison of Relative Exposure Distributions by FAB Type	19
Table 5. Detection Rates and Significance of Hazardous Substances in 200mm vs. 300mm FABs	22

List of Figures

Fig 1. Comparison of Detection Rates and Relative Rates of Hazardous Substance by Process and FAB Type (200mm vs. 300mm)	15
Fig 2. ORs and 95% CIs for 6 significant substances in 200mm vs. 300mm FABs	26

국문요약

반도체 산업의 200mm와 300mm FAB의 작업환경 유해물질 노출 특성 비교

반도체 제조공정은 고정정·고정밀 환경에서 다양한 유해화학물질이 사용되는 산업으로, 공정 구조와 자동화 수준에 따라 유해물질의 노출 특성이 크게 달라질 수 있다. 최근 도입된 300mm FAB은 기존 200mm FAB에 비해 장비 밀폐성과 자동화 수준이 현저히 향상되었으나, 두 FAB 간 작업환경 노출 수준의 정량적 차이는 실측 기반으로 충분히 비교된 바 없다.

본 연구는 반도체 산업 내 200mm 및 300mm FAB에서 2021년부터 2023년까지 수집된 총 11,703건의 작업환경측정 데이터를 바탕으로, 공정별·직무별·물질별 유해물질 노출 특성을 정량적으로 비교하였다. 측정값은 고용노동부 고시에 따른 작업환경 허용기준(OEL: Occupational Exposure Limit) 대비 백분율로 환산하였으며, 검출률, 상대위험도(Relative Rate), 검출률 차이(Detection Difference), Fisher의 Exact Test 등을 적용하여 통계적 유의성을 평가하였다. 불검출(None Detected) 사례가 많은 반도체 산업의 특성을 고려하여, 단순 평균 중심의 비교를 지양하고, ND 조건에서도 적용 가능한 통계 기법을 통해 실질적인 노출 특성을 도출하였다.

분석 결과, 대부분의 공정과 직무에서 300mm FAB이 200mm FAB에 비해 유의하게 낮은 검출률을 보였으며, 특히 Etch, Diffusion, C&C 공정에서는 70% 이상의 노출 저감 효과가 확인되었다. 전체 평균 검출률은 200mm FAB이 18.3%, 300mm FAB이 5.4%로 약 3.4배 차이를 보였고, 통계적으로 유의한

차이는 총 13종의 유해물질에서 확인되었다($p < 0.05$). 특히 KOSHA 기준 CMR(발암성, 생식독성, 변이원성) 유해물질만을 기준으로 할 경우, 200mm FAB의 검출률은 3.6%, 300mm FAB은 0.5%로 나타나 구조 및 설비 차이에 따른 고유해성 물질의 노출 차이가 명확히 확인되었다.

직무 유형별로는 운영직무에서 300mm FAB의 노출률이 현저히 낮은 반면, 장비 개방이 수반되는 유지보수 직무에서는 FAB 간 유의한 차이가 나타나지 않아, 해당 직무에 대한 별도의 국소배기·환기 보완이 요구된다. 본 연구는 구조 전환 이후 FAB 간 노출 환경의 상대적 특성을 정량적으로 비교·검증한 실증적 사례로, 향후 반도체 FAB의 구조 설계, 작업환경 개선, 고위험 물질 관리 및 건강영향평가에 필요한 산업보건학적 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심어: 반도체 FAB, 유해물질 노출, 작업환경측정, CMR 물질, 상대위험도

I. 서론

1. 연구배경 및 필요성

반도체 산업은 미세한 공정을 다루는 만큼, 정밀한 기술력과 고청정 환경 유지가 동시에 요구되는 대표적인 첨단 산업이다. 식각(Etch), 증착(Thin Film), 노광(Photo), 세정(Cleaning) 등 주요 공정에서는 다양한 휘발성 유기화합물(VOCs), 산·염기성 가스, 금속 미스트 등 유해 화학물질이 사용되며, 근로자는 이들에 반복적이고 누적적으로 노출될 가능성이 있다(MacGibbon, 2000; Park et al., 2011). 공정 대부분이 밀폐된 공간에서 이루어지기 때문에 일반 제조업과 비교하면 평균 유해물질 농도는 낮은 편이나, 장비 개방이나 정비 과정처럼 통제가 어려운 작업에서는 일시적인 고농도 노출이 발생할 수 있다. 이에 따라 국소 배기장치 설치, 장비 밀폐화 등 노출 저감 기술은 여전히 핵심적인 관리 요소로 간주되고 있다(Park et al., 2018; Lee et al., 2011).

최근 반도체는 단순 제조업의 범주를 넘어, 한 국가의 전략 산업으로서의 위상이 강화되고 있다. 글로벌 공급망의 불안정성, 미·중 간 기술 경쟁 심화, 인공지능 및 자율주행 기술의 급속한 발전 등은 주요 국가들이 반도체 기술 확보에 총력을 기울이게 만들었다. 이에 따라 우리나라 정부도 2021년 ‘K-반도체 전략’을 발표하여 생산기지 확대, 소재·장비의 국산화, 전문 인력 양성에 나섰으며, 2024년에는 ‘반도체 초격차 전략 2.0’을 통해 첨단 공정 특화단지 조성 및 R&D 투자 확대 등 산업 전반의 고도화를 추진하고 있다. 이와 같은 산업 경쟁 심화 속에서 반도체 제조현장의 작업환경 안정성 확보는 단순한 산업재해 예방을 넘어, 산업의 지속가능성과 국가 경쟁력 유지를 위한 필수 조건으로 부각되고 있다. 특히 클린룸과 같은 고도로 제어된 공간에서는 생산 효율성과 더불어, 근로자의 건강 보호라는 이중 과제를 동시에 달성해야

할 필요성이 커지고 있다.

이러한 변화 속에서 FAB(Fabrication Facility)의 구조 및 운영 방식도 기존과는 크게 달라졌다. 특히 300mm(12인치) 웨이퍼 공정은 FOUP, OHT, mini-environment 등 자동화 시스템이 본격적으로 구축되면서, 기존 200mm(8인치) 공정에 비해 작업자 개입이 현저히 줄어든 무인·밀폐형 운영이 가능해졌다(TSMC, 2007; Wang et al., 2004). 이는 생산성 향상과 동시에 유해물질 노출 저감 측면에서도 긍정적인 효과를 가져오는 것으로 평가되고 있다. 공간 구조 또한 차이를 보인다. 200mm FAB은 공정 장비와 부대 설비가 수평적으로 배치된 2층 구조인 반면, 300mm FAB은 FAB, CSF(Clean Sub FAB), FSF(Facility Sub FAB)로 구분되는 3층 구조로 장비와 설비가 물리적으로 분리되어 있다(MacGibbon, 2000; Park et al., 2019). 이러한 구조적 차이는 유해물질의 체류, 확산, 잔류 방식에 영향을 미치며, 노출 경로 및 농도 양상에도 차이를 유발할 수 있다.

반도체 공정에 사용되는 화학물질 중에는 생식독성, 호흡기 자극성, 피부 과민성 등 다양한 유해성을 가진 물질이 포함되어 있으며(OSHA, 2021; EPA, 2015; IARC, 2020), 특히 휘발성이 높은 물질일수록 밀폐된 공정 환경에 장시간 머물 경우 노출 가능성이 증가할 수 있다. 또한 복수의 유해물질이 동시에 존재하는 환경에서는 상호작용에 의한 복합 노출 위험이 존재하며, 이로 인해 단일 물질 기반의 독성 평가만으로는 실제 건강 영향을 완전히 설명하기 어렵다. 따라서 물질의 독성뿐 아니라 사용량, 제어 조건, 휘발성까지 함께 고려한 다차원적인 노출 평가 체계가 필요하다.

일부 연구에서는 백혈병, 재생불량성 빈혈, 림프·조혈기계 암 등 중증 질환의 발생이나 여성 근로자에서의 자연유산 사례가 높게 나타난 바 있다(Schenker et al., 1995; Chung et al., 2012; Lee et al., 2023). 그러나

기존의 역학조사들은 조사 대상의 이질성, 공정 세대 간 차이, 물질 사용 정보의 불완전성 등으로 인해 연구 결과 간 일관성이 낮고, FAB 구조 및 운영 방식 변화에 따른 유해물질 노출 특성 차이를 실측 기반으로 분석한 연구는 매우 제한적이다(Park et al., 2018; Park et al., 2019).

국내에서도 반도체 근로자를 대상으로 한 건강영향 평가와 역학조사가 여러 차례 수행되었으며, 산업안전보건공단이 발표한 「반도체 제조공정 근로자에 대한 건강실태 역학조사(암 질환 중심)」(2019)에서는 입사 시점이 2010년 이전인 근로자에서 백혈병, 림프종 등의 암 발생 위험이 더 높은 경향이 있음을 보고하였다. 이는 2010년을 전후로 FAB 구조가 본격적으로 전환되었고, 자동화 수준 향상, 장비 밀폐화, 화학물질 취급 방식 개선 등 작업환경 전반에 유의미한 변화가 있었던 사실과 맞물려, FAB 구조 변화가 건강영향에 영향을 미쳤을 가능성을 시사한다.

실제로 300mm FAB의 도입은 2010년 이후 본격화되었으며, FOUP, OHT, mini-environment와 같은 무인·밀폐형 자동화 시스템이 구축됨에 따라 작업자 개입이 줄어들고, 유해물질 노출 가능성도 구조적으로 감소했을 것으로 판단된다. 이러한 구조 및 운영상의 변화는 단순한 장비 재배치를 넘어, 유해물질 노출 수준뿐 아니라 건강영향 해석에도 중대한 영향을 줄 수 있다. 그럼에도 불구하고, FAB 구조 전환 이후의 실측 데이터를 기반으로 FAB 간 유해물질 노출 특성을 정량적으로 분석한 연구는 여전히 부족하며, 기존 연구들 또한 대부분 구조 전환 이전이나 과도기 시점의 환경을 기준으로 하고 있어 현재의 작업환경을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다.

또한 현행 작업환경측정 제도에서는 다수의 물질이 ‘ND(None Detected)’로 표시되어, 저농도에서의 장기 노출이나 일시적 고농도 노출 가능성을 충분히 반영하지 못하는 구조적 한계를 지닌다(Kim et al., 2011). 복합 노출 또한

별도로 측정되지 않아 실제 작업환경을 온전히 설명하기 어렵다. 그럼에도 불구하고, 동일 공정 조건에서 수집된 작업환경측정 결과는 FAB 간 상대적인 노출 수준을 비교하는 데 일정 수준 이상의 타당성과 실효성을 갖는다.

이에 본 연구는 200mm FAB과 300mm FAB을 대상으로 동일 공정에서 수행된 작업환경측정 데이터를 활용하여 직무·공정·물질별 유해물질 노출 특성을 비교·분석하고자 한다. 이를 통해 FAB 구조 및 운영 방식의 차이가 유해물질 노출 특성에 미치는 영향을 실증적으로 고찰하고, 향후 작업환경 개선 및 근로자 건강 보호를 위한 과학적 근거를 제시하는 데 목적이 있다.

2. 연구목적

반도체 산업은 고청정·고정밀 공정을 기반으로 다양한 화학물질이 사용되며, 특정 직무나 공정에 종사하는 작업자는 반복적이고 누적적인 유해물질 노출에 노출될 수 있다. 최근 자동화 수준과 장비 밀폐성이 향상된 300mm FAB이 도입되면서, 기존 200mm FAB과의 작업환경 차이에 대한 관심이 높아지고 있으나, 두 FAB 간 유해물질 노출 수준을 정량적으로 비교한 실증 연구는 매우 제한적이다.

본 연구는 200mm FAB과 300mm FAB에서 수행된 작업환경측정 데이터를 활용하여, 설비 구조와 자동화 수준의 차이가 실제 작업자 노출에 미치는 영향을 통계적으로 분석하고자 하였다. FAB 유형 외에도 직무 유형(운영직 vs. 유지보수직), 공정 유형(Etch, Thin Film, Photo 등), 유해물질의 건강 유해성 수준(CMR 등)에 따라 노출 특성을 세분화함으로써, 두 FAB 간 상대적 노출 환경을 다면적으로 파악하는 것을 목표로 한다.

또한, 2010년 FAB 구조 변화 시점을 반영하여 이후 세대 FAB의 노출 특성을 실측 기반으로 분석하고, 건강 영향 평가에 필요한 기초자료를 마련하고자 한다. 특히 불검출(None Detected) 사례가 많은 반도체 산업의 특성을 고려하여, 단순 평균 비교를 넘어 실질적인 검출 경향 및 상대적 위험 수준 비교가 가능한 통계 분석 방법을 적용하였다.

이를 통해 현재 제도 내에서 수집 가능한 작업환경측정 데이터를 바탕으로 FAB 간 노출 특성을 신뢰성 있게 비교하고, 향후 구조 설계 개선, 유해물질 관리, 작업자 건강 보호를 위한 실무적·정책적 기초자료로 활용하는 데 연구의 목적이 있다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 반도체 제조 공정에서의 유해물질 노출 수준 차이를 비교하기 위해, 웨이퍼 크기 및 공정 구조가 상이한 200mm FAB과 300mm FAB을 비교 분석의 대상으로 선정하였다. 연구 대상은 각 FAB 내에서 실제 제조활동이 수행되는 대표적인 5개 공정으로 한정하였으며, 분석 대상은 식각(Etch), 증착(Thin Film Deposition), 포토(Photo Lithography), 확산(Diffusion), 화학기계 연마(CMP, Chemical Mechanical Polishing) 공정으로 선정하였다.

작업자의 실제 유해물질 노출 특성을 정밀하게 반영하기 위해, 노출 측정은 개인 시료 채취(Personal Sampling) 방식으로 수행되었으며, 측정 대상자는 해당 FAB 내 공정에 실제 종사하는 오퍼레이터(Operator)와 공정 엔지니어(Maintenance)로 구분하여 선정하였다. 각 작업자는 최소 6시간 이상의 작업 수행 중 호흡 영역(Breathing Zone)에서 연속적으로 시료가 채취되었다.

본 연구는 산업안전보건법 제125조 및 「작업환경측정 및 평가 등에 관한 고시」에 근거하여 수행되었으며, 2021년부터 2023년까지의 3개년간의 데이터를 기반으로 총 11,703건의 작업환경 측정 자료를 확보하여 분석하였다.

2. 연구전략

본 연구는 200mm FAB과 300mm FAB에서 수집된 작업환경측정 데이터를 기반으로 유해물질 노출 특성의 차이를 정량적·통계적으로 분석하였다. 분석 대상은 실제 제조 활동이 이루어지는 Etch, Thin Film, Photo, Diffusion, CMP 등 5개 주요 공정이며, 작업자는 직무 유형(Operator, Maintenance)을 기준으로 분류하였다.

측정된 유해물질 농도는 고용노동부 고시에 따른 작업환경 허용기준(Occupational Exposure Limit, OEL)을 기준으로 백분율(%)로 환산하여 활용하였으며, 공정 유형, FAB 유형, 직무 유형에 따른 노출 경향을 비교하였다. 노출 특성의 정량 비교를 위해 Odds Ratio(OR) 및 상대위험도(Relative Rate, RR)를 산출하고, 변수 간 분포 차이의 유의성은 카이제곱 검정(χ^2 test)을 통해 평가하였다. 분석은 SAS 통계 소프트웨어를 활용하였고, 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였다.

또한, 전체 자료에서는 다수 항목에서 불검출(ND, None Detected) 사례가 관찰되어, 평균값이나 중앙값을 기반으로 한 정량 분석에는 한계가 있었다. 특히 300mm FAB에서는 ND 비율이 상대적으로 높아, 단순 비율 비교보다는 빈도 기반의 지표와 비모수 검정 기법이 더욱 적절한 해석 도구로 판단되었다.

이에 본 연구는 FAB 간 유해물질 검출 특성을 정량적으로 비교하기 위해 Detection Difference 지표를 도입하고, 검출값이 불검출인 경우에도 적용 가능한 Fisher의 정확검정(Fisher's Exact Test)을 병행하여 분석의 통계적 신뢰성을 확보하고자 하였다. ND 항목에 대해서는 별도의 수치 대입 없이 불검출로 처리하였으며, 평균값 산출이나 분포 기반의 정량 비교는 수행하지 않았다.

대신, 검출률, 최대값, OEL 대비 수준 등 빈도 기반의 지표를 중심으로 분석을 구성하였다.

또한, 각 물질의 검출한계(LOD, Limit of Detection)는 측정법상 특성과 ND 해석을 보완하는 참고자료로서 부록에 제시하였으며, 본문의 통계 분석에는 적용하지 않았다.(부록 1참조) 이러한 분석 전략은 ND 비율의 영향을 고려하면서도, 두 FAB 간 구조적·운영상 특성이 실제 노출 수준에 미치는 영향을 객관적이고 실증적으로 해석할 수 있도록 하였다.

3. 측정 및 분석방법

본 연구는 산업안전보건법 제125조 및 「작업환경측정 및 평가 등에 관한 고시」(고용노동부 고시 제2020-48호)에 근거하여 수행되었으며, 반도체 제조 공정 중 확산(Diffusion), 박막 증착(Thin Film), 포토리소그래피(Photo), 세정(Cleaning), 식각(Etch) 등 5개 공정을 중심으로 작업환경측정을 실시하였다.

작업자의 실제 노출 수준을 보다 정밀하게 평가하기 위해 시간가중평균(Time Weighted Average, TWA) 기반의 개인시료 포집(Personal Sampling) 방식을 적용하였고, 시료 채취는 대상 물질에 따라 상이한 시료 채취 방법을 적용하였다. 예를 들어, 유기화합물(예: IPA)은 활성탄 흡착관 및 확산형 모니터(Passive Diffusion Monitor)를 사용하였으며, 산·알칼리류는 실리카겔 튜브(Silicagel Tube)를 활용한 가스 흡착 방식, 오존(O_3) 및 염소(Cl_2)와 같은 가스상 물질은 흡수액 포집법을 통해 수집하여 오염을 방지하기 위해 밀봉 후 분석기관으로 이송되었다. 분석은 국내외 공인 분석법(KOSHA, NIOSH, OSHA 등)에 따라 수행되었으며 유기화합물은 가스크로마토그래피(GC-FID 또는 GC-MS)를 이용하였고, 금속류는 유도결합 플라즈마 질량분석법(ICP-MS) 또는 원자흡광광도법(AAS)을 적용하였다. 가스상 물질은 이온크로마토그래피(IC) 기법을 통해 분석하였다.

본 연구는 동일한 분석기관에서 동일한 방법으로 수행된 2021년부터 2023년까지 3개년 작업환경측정 데이터를 활용하였다. 총 5개 공정에서 수집된 11,703건의 측정값은 노출 수준 비교를 위한 기초 자료로 활용되었으며, 이는 연구의 정량성과 통계적 신뢰도를 높이는 기반이 되었다(표 1).

Table 1. Annual Number of Workplace Environment Measurements by FAB Type and Process

FAB	Classification	2021	2022	2023	Subtotal	Total
200mm	Diffusion	203	258	228	689	11,703
	C&C	8	12	18	38	
	Etch	234	234	286	754	
	Photo	313	260	269	842	
	Thinfilmm	75	73	97	245	
300mm	Diffusion	490	454	470	1,414	
	C&C	752	873	450	2,075	
	Etch	728	1220	628	2,576	
	Photo	762	552	374	1,688	
	Thinfilmm	610	526	246	1,382	

4. 윤리적 고려

본 연구는 연세의료원 세브란스병원 연구심의위원회의 면제심의승인(IRB No: 4-2025-0235)을 받았으며, 사용된 자료는 개인 식별 정보가 포함되지 않은 작업환경 측정 데이터로, 모든 자료는 비식별화된 상태에서 분석되었다.

Ⅲ. 연구결과

1. 반도체 공정별 노출 평가

FAB 유형별 유해물질 검출 특성을 정량적으로 비교하기 위해, 각 공정에서의 유해물질 검출 건수 및 검출률을 200mm FAB과 300mm FAB에 대해 산출하고, 상대위험도(Relative Rate, RR)와 95% 신뢰구간(95% CI)을 산정하였다. 분석 대상 공정은 DIFF(확산), C&C(Cleaning & CMP), ETCH(식각), Photo(노광), Thin Film(박막)으로 구분하였다.

DIFF 공정에서는 200mm FAB에서 142건(20.6%), 300mm FAB에서 74건(5.2%)이 검출되어, RR은 3.94 (95% CI: [3.019, 5.137])로 분석되었다. C&C 공정은 200mm FAB 11건(28.9%), 300mm FAB 75건(3.6%)으로 RR은 8.01 (95% CI: [4.642, 13.818])로 나타났다. ETCH 공정에서는 200mm FAB 171건(22.7%), 300mm FAB 114건(4.4%)이 검출되어, RR은 5.12 (95% CI: [4.102, 6.403])로 확인되었다. Thin Film 공정은 200mm FAB 46건(18.8%), 300mm FAB 83건(6.0%)이며, RR은 3.13 (95% CI: [2.239, 4.364])이었다. 반면, Photo 공정은 RR 1.37 (95% CI: [1.079, 1.747])로, 통계적으로는 유의하나 다른 공정보다 차이가 작아 해석 시 주의가 필요하다(표 2, 그림 1).

종합적으로, RR이 1.0을 초과하고 95% 신뢰구간이 이를 포함하지 않는 모든 공정에서 200mm FAB의 유해물질 노출 위험이 통계적으로 유의하게 더 높았다. 특히 C&C, Etch, Diffusion 공정은 RR이 3.9~8.0 수준으로, 200mm FAB에서의 노출 위험이 300mm FAB 대비 수 배 이상 높은 것으로 나타났다. 이는 역으로 해석하면, 300mm FAB은 동일 조건하에서 약 74%에서 최대 88%의 노출 저감 효과를 보인다는 것을 의미하며, FOUP 및

OHT(Overhead Hoist Transport) 기반 자동화 이송 시스템, mini-environment 장비 밀폐화, 국소배기 성능 향상 등의 구조적·설비적 개선이 실제 노출 저감에 유효하게 작용하고 있음을 보여준다.

Table 2. Comparative Analysis of Hazardous Substance Detection by Process and FAB Type (200mm vs. 300mm)

Classification	200mm			300mm			RR	95%CI
	Meas.	Detec.	Detec. Rate	Meas.	Detec.	Detec. Rate		
DIFF	689	142	20.6%	1414	74	5.2%	3.94	3.01, 5.13
C&C	38	11	28.9%	2075	75	3.6%	8.01	4.64, 13.81
ETCH	754	171	22.7%	2576	114	4.4%	5.12	4.10, 6.40
Photo	842	100	11.9%	1688	146	8.6%	1.37	1.07, 1.74
ThinFilm	245	46	18.8%	1382	83	6.0%	3.13	2.23, 4.36

*Abbreviations: Meas. = Measurements; Detec. = Detections; Detec. Rate = Detection Rate (%); RR = Relative Rate; CI = Confidence Interval.

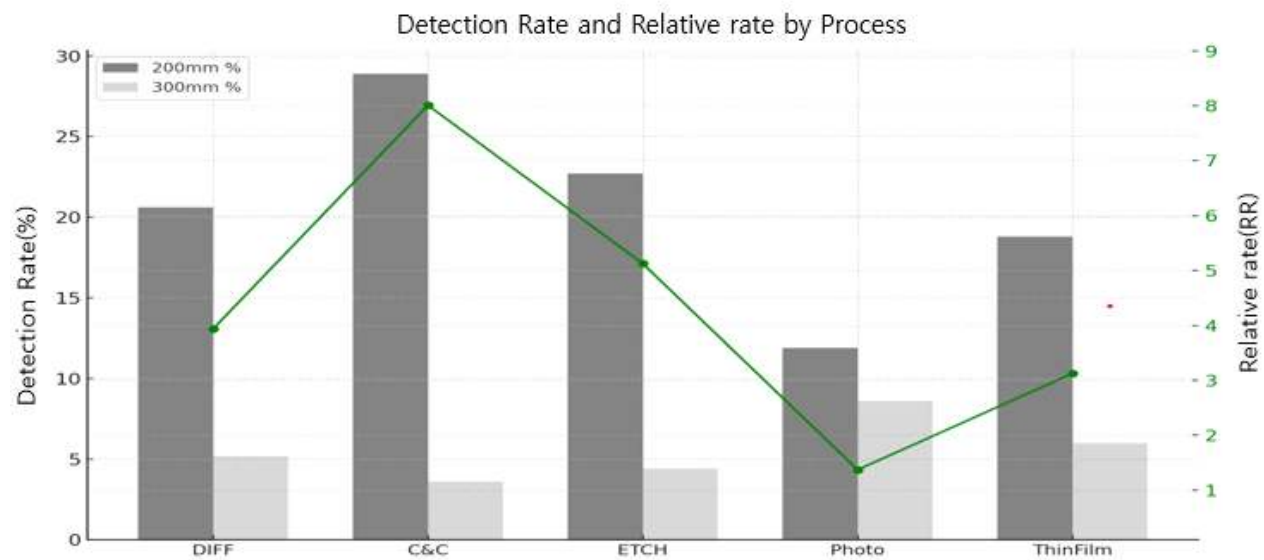


Fig 1. Comparison of Detection Rates and Relative Rates of Hazardous Substance by Process and FAB Type (200mm vs. 300mm)

2. 직군별 노출 평가

FAB 유형에 따른 유해물질 검출 특성을 보다 세부적으로 파악하기 위해, 작업 유형을 운영(Operation)과 유지보수(Maintenance)로 구분하여 각 직무별 검출률을 비교하였다(표 3).

오퍼레이터 직군에서는 200mm FAB에서 18.9%의 검출률이 나타났고, 300mm FAB에서는 5.7%로 확인되었다. 두 FAB 간의 차이는 통계적으로 유의하였으며($p < 0.001$), 오퍼레이터 직군에서 200mm FAB의 검출률이 300mm FAB보다 현저히 높은 수준을 보였다.

유지보수 직군의 경우, 200mm FAB에서의 유해물질 검출률은 5.5%, 300mm FAB에서는 5.1%로 확인되었으며, 두 군 간의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다($p = 1.00$). 또한, 유지보수 직군에 대한 측정 건수는 300mm FAB에서 더 많았으나, 검출률은 200mm FAB과 유사한 수준을 유지하였다

Table 3. Job-Based Comparison of Hazardous Substance Detection by FAB Type

Category		FAB		p-value
		200mm	300mm	
Oper.	Meas.	2,458	4,137	< 0.001
	Detec.	464	235	
	Detec. Rate(%)	18.9	5.7	
Maint.	Meas.	110	4,998	1
	Detec.	6	257	
	Detec. Rate(%)	5.5	5.1	

*Abbreviations: Meas. = Measurements; Detec. = Detections; Detec. Rate = Detection Rate (%).

3. 작업환경 허용기준(Occupational Exposure Limit, OEL) 대비 노출 수준 평가

FAB 유형에 따른 유해물질의 상대적 노출 수준을 비교하기 위해, 측정된 농도를 고용노동부 고시 ‘작업환경 허용기준’(Occupational Exposure Limit, OEL) 대비 백분율로 환산한 후, 노출 수준에 따라 세 가지 구간으로 분류하여 분석을 수행하였다. 각 구간은 OEL의 5% 미만, 5% 이상 ~ 10% 미만, 10% 이상으로 설정하였으며, 이는 반도체 제조 환경에서 대부분의 유해물질이 저농도 수준으로 관리되고 있다는 점과, 사전 예방적 건강보호 관점에서의 평가 민감도를 고려한 구간 설정이다.

분석 결과, OEL 대비 5% 미만의 노출군에 해당하는 측정값은 200mm FAB에서 2,544건(99.06%), 300mm FAB에서는 9,135건(100%)으로 나타났다. 두 FAB 모두 대부분의 측정값이 매우 낮은 농도로 관리되고 있었으며, 특히 200mm FAB에서도 OEL의 10%를 초과하는 사례는 단 1건(0.04%)에 불과하여, 전반적으로 안정적인 작업환경이 유지되고 있음을 보여준다.

OEL의 5% 이상 ~ 10% 미만 구간에서는 200mm FAB에서 23건(0.89%)이 확인되었고, 300mm FAB에서는 해당 구간에 속하는 사례가 존재하지 않았다. OEL의 10%를 초과한 측정 사례는 200mm FAB에서 1건(0.04%)이 보고되었으며, 300mm FAB에서는 이와 같은 사례가 관찰되지 않았다(표 4).

이와 같이 OEL 기준에 따른 노출 분포를 종합적으로 비교한 결과, 300mm FAB에서는 모든 측정값이 OEL의 5% 미만으로 유지된 반면, 200mm FAB에서는 일부 측정값이 상위 노출 구간에 분포하였다. 이는 두 FAB 모두 작업환경 노출 수준이 전반적으로 안정적으로 관리되고 있으나, 설비 구조 및 운영 방식의 차이에 따라 상대적인 노출 저감 효과에서 차이가 발생할 수 있음을 시사한다.

Table 4. Comparison of Relative Exposure Distributions by FAB Type Based on Korean Occupational Exposure Limits (OELs)

Category	200mm		300mm	
	Detec.	Detec. Rate(%)	Detec.	Detec. Rate(%)
< 5.0% of OEL (including non-detects)	2,544	99.06	9,135	100
\geq 5.0% and < 10% of OEL	23	0.89	-	-
\geq 10% of OEL	1	0.04	-	-

*Abbreviations

OEL = Occupational Exposure Limit

Detec. = Detections

Detec. Rate = Detection Rate (%)

4. 200mm 대비 300mm FAB의 유해물질 검출률 및 통계적 유의성 비교

200mm와 300mm FAB 공정에서 측정된 총 48종의 유해화학물질에 대해, FAB 유형에 따른 유해물질 검출 특성을 비교하였다. 화학물질 검출 빈도의 차이를 정량적으로 평가하여, 각 물질이 실제로 얼마나 감소하거나 증가했는지를 객관적으로 확인하고자 검출률의 절대적 차이(Detection Difference, DD)를 산출하였고, 실질적인 공정 변화나 관리 방안의 효과에 따른 차이가 통계적으로 유의한지를 검토하기 위해 Fisher's Exact Test를 수행하였다.

전체 평균 검출률은 200mm FAB에서 18.3%(470/2,568), 300mm FAB에서는 5.4%(492/9,135)로 나타나, 200mm FAB이 약 3.4배 높은 노출 경향을 보였다. 물질별 검출률 차이는 최대 +41.1%p에서 최소 -3.1%p까지 분포하였으며, DD를 통해 FAB 간 차이의 크기와 방향을 백분율 포인트(%p) 단위로 확인할 수 있었다. 통계 분석 결과, 총 13종의 물질에서 $p < 0.05$ 수준의 유의성이 확인되어 두 FAB 간 유의미한 노출 특성 차이가 있는 것으로 나타났다.

전체 물질 중 KOSHA 기준에 따른 CMR(Carcinogenicity, Mutagenicity, Reproductive toxicity) 분류 물질은 12종이었으며, 이들 고위험군에서 200mm FAB의 평균 검출률은 3.6%(92/2,568), 300mm FAB은 0.5%(48/9,135)로 나타나, 구조적으로 유해물질 노출 차이가 존재함을 확인하였다. 예를 들어, 황산(pH 2.0 이하, Carc. 1A, 흡입 시)과 비소 및 그 무기화합물(Carc. 1A)은 200mm FAB에서 각각 15.4%, 18.8%의 검출률을 보인 반면, 300mm FAB에서는 모두 검출되지 않았으며(DD 각각 15.4%p, 18.8%p, $p < 0.05$), 포름알데히드(Carc. 1B, Muta. 2)의 경우 200mm FAB에서 70.0%, 300mm FAB에서 39.3%로 약 두 배 가까운 차이를 보였다(DD 30.7%p, $p < 0.05$).

양쪽 FAB에서 모두 검출된 물질 중 검출률에 유의한 차이를 보인 물질도 확인되었다. 수산화칼륨은 200mm FAB에서 33.3%, 300mm FAB에서 1.7%의 검출률을 나타냈으며(DD 31.6%p, $p < 0.05$), 암모니아(200mm 49.6%, 300mm 24.4%, DD 25.2%p, $p < 0.05$), 염소(200mm 45.7%, 300mm 4.6%, DD 41.1%p, $p < 0.05$), 이소프로필알코올(200mm 39.7%, 300mm 1.5%, DD 38.2%p, $p < 0.05$), 질산(200mm 34.7%, 300mm 12.4%, DD 22.3%p, $p < 0.05$)도 200mm FAB에서 유의하게 높은 검출률을 보였다. 포스핀은 200mm FAB에서만 검출되어 FAB 간 차이를 보였다(DD 2.9%p, $p < 0.05$).

반면, 통계적으로 유의성이 확인되지 않은 일부 물질들은 FAB 간 검출률 차이가 미미하거나, 양쪽 모두에서 낮은 검출률을 보였다. 예를 들어, 알루미늄 및 그 화합물은 각각 42.9%, 37.8%로 유사한 수치를 나타냈고(DD 5.1%p, $p = 0.6791$), 염산(염화수소)은 55.4%, 52.9%로 큰 차이가 없었다(DD 2.5%p, $p = 0.8697$). 일부 물질(예: 텅스텐, 인산 등)은 300mm FAB에서 다소 높은 검출률을 보였으나, 통계적으로는 유의하지 않았다.

전체적으로 검출률이 매우 낮거나 양 FAB 모두에서 검출되지 않은 물질들은 두 FAB 간 명확한 차이를 도출하기 어려웠으며, 양쪽 모두에서 일정 수준 이상 안정적으로 관리되고 있음을 시사한다.

이상의 결과는 두 FAB 간 공정 장비 구조, 밀폐 수준, 자동화 시스템, 청정도 관리체계 등 전반적인 환경 조건의 차이가 유해물질의 공기 중 노출 수준에 구조적인 영향을 미치고 있음을 보여준다.

Table 5. Detection Rates and Significance of Hazardous Substances in 200mm vs. 300mm FABs

Substance Name	CMR (KOSHA)	Detec. Rate(%)		DD (%p)	Odds Ratio	p-value
		200mm	300mm			
Sulfuric acid (pH ≤ 2.0)	Carc.1A,(inh.)	15.4	0	15.4	-	< 0.05
Arsenic and its inorganic compounds	Carc.1A	18.8	0	18.8	-	< 0.05
Titanium dioxide	Carc.2(inh.)	Not measured	0	-	-	-
Antimony trioxide	Carc.2	54.2	Not measured	-	-	-
Nickel and its compounds	Carc.1A	Not measured	0	-	-	-
Formaldehyde	Carc.1B Muta.2	70	39.3	30.7	3.604	< 0.05
Cobalt and its inorganic compounds	Carc.1B(inh.) Repr. tox.1B	Not measured	5.3	-	-	-
1,4-Dioxane	Carc.2	1.2	0	1.2	-	1
Arsine(AsH ₃)	Carc.1A	2.1	0	2.1	-	0.4211
2-Ethoxyethanol	Repr. tox.1B	Not measured	0	-	-	-
N,N-Dimethylacetamide	Repr. tox.1B	Not measured	0	-	-	-
Methyl alcohol	Repr. tox.2	0	Not measured	-	-	-
1,2-Dichloroethylene	None	12.5	0	12.5	-	< 0.05

Substance Name	CMR (KOSHA)	Detec. Rate(%)		DD (%p)	Odds Ratio	p-value
		200mm	300mm			
2-Hexanone	None	Not measured	0	-	-	-
Phenol	None	0	Not measured	-	-	-
Copper and its compounds	None	Not measured	31.6	-	-	-
Normal butyl acetate	None	0	0	0	-	1
Ozone	None	30.4	0	30.4	-	< 0.05
Fluorine	None	36.2	0	36.2	-	< 0.05
Hydrogen fluoride(Ceiling)	None	0.8	0	0.8	-	0.2359
Hydrogen fluoride	None	1.5	0	1.5	-	0.2359
Hydrogen bromide	None	0	0.3	-0.3	-	1
Methyl n-amyl ketone	None	0	0	0	-	1
Potassium hydroxide	None	33.3	1.7	31.6	28.868	< 0.05
Cyclohexanone	None	0	0	0	-	1
Acetone	None	0	Not measured	-	-	-
Aluminum and its compounds	None	42.9	37.8	5.1	1.236	0.6791
Ammonia	None	49.6	24.4	25.2	3.049	< 0.05

Substance Name	CMR (KOSHA)	Detec. Rate(%)		DD (%p)	Odds Ratio	p-value
		200mm	300mm			
Ethanolamine	None	0	0	0	-	1
Ethylene glycol	None	Not measured	0	-	-	-
Hydrochloric acid	None	55.4	52.9	2.5	1.106	0.8697
Chlorine	None	45.7	4.6	41.1	17.454	< 0.05
Isopropyl alcohol	None	39.7	1.5	38.2	43.233	< 0.05
Phosphoric acid	None	0	3.1	-3.1	0	0.1214
Nitric oxide	None	0	1.4	-1.4	0	1
Carbon monoxide	None	Not measured	0	-	-	-
Zirconium and its compounds	None	Not measured	3.6	-	-	-
Nitric acid	None	34.7	12.4	22.3	3.754	< 0.05
Acetic acid	None	0	0	0	-	1
Hydrogen peroxide	None	25.6	0	25.6	-	< 0.05
Cresol	None	0	0	0	-	1
Tungsten and its compounds	None	10	12.9	-2.9	0.75	0.6584
Phosphine	None	2.9	0	2.9	-	< 0.05

Substance Name	CMR (KOSHA)	Detec. Rate(%)		DD (%p)	Odds Ratio	p-value
		200mm	300mm			
Silver	None	Not measured	17.6	-	-	-
Pyridine	None	0	0	0	-	1
Indium and its compounds	None	12.5	Not measured	-	-	-
Ethyl silicate	None	0	Not measured	-	-	-
Nitrogen dioxide (NO ₂)	None	Not measured	0	-	-	-

*Abbreviations:

Detec. Rate = Detection Rate(%);

DD = Detection Rate Difference (percentage point);

CMR = Carcinogenicity, Mutagenicity, Reproductive toxicity classification by KOSHA;

OR = Odds Ratio;

Not measured = Monitoring was not conducted for the substance in the specified FAB.

Carc. = Carcinogenicity;

Muta. = Mutagenicity;

Repr. tox. = Reproductive toxicity;

(inh.) = Classification limited to inhalation exposure;

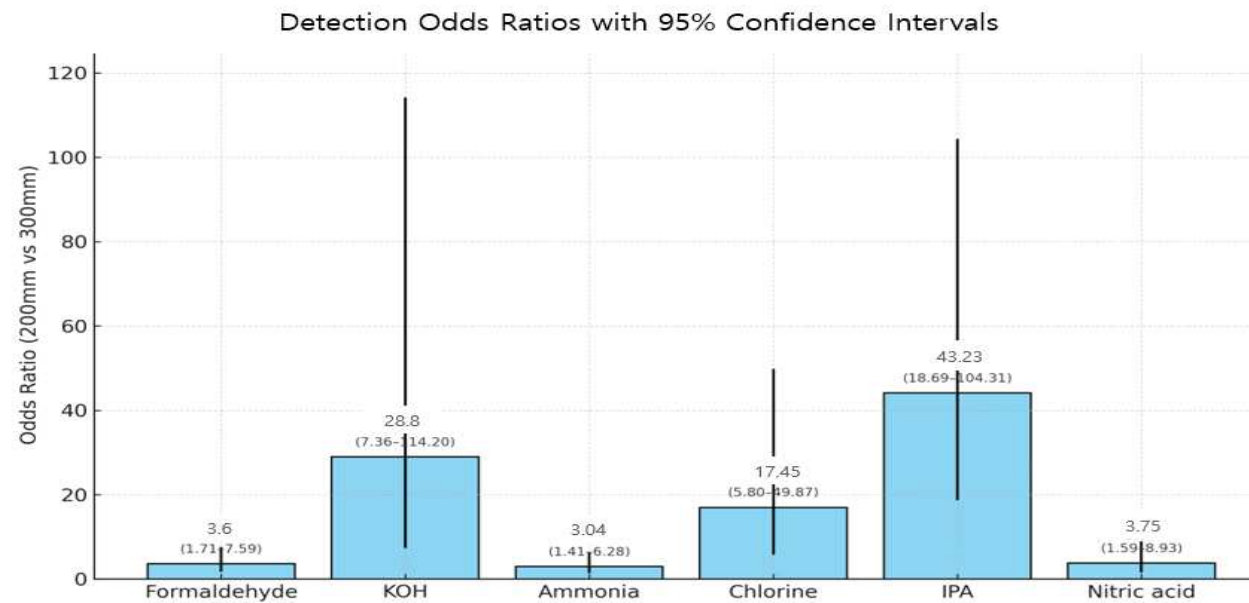


Fig 2. Odds Ratios (ORs) and 95% Confidence Intervals (CIs) for Six Statistically Significant Substances in 200mm versus 300mm Semiconductor FABs

IV. 고찰

본 연구는 동일 공정 조건 하에서 수행된 200mm FAB과 300mm FAB의 작업환경측정 데이터를 기반으로 유해물질 노출 특성을 정량적으로 비교·분석하고, FAB 구조 및 자동화 수준의 차이가 실제 작업자 노출 수준에 어떠한 영향을 미치는지를 실증적으로 평가하였다. 특히 다수의 물질이 ND(None Detected)로 보고되는 반도체 산업의 특수성을 고려하여, 단순 평균 비교에 그치지 않고 검출률, 상대위험도(Relative Risk), 검출률 절대차(Difference in Detection, DD), Fisher's Exact Test 등의 통계지표를 병행 적용함으로써, FAB 간 상대적 노출 수준의 차이를 다차원적으로 해석할 수 있는 분석 프레임워크를 구성하였다.

OEL(Occupational Exposure Limit) 대비 백분율 환산을 통해 노출 수준을 세 구간(5% 미만, 5~10% 미만, 10% 이상)으로 분류한 결과, 300mm FAB은 전 구간에서 OEL의 5% 미만으로 관리되고 있었으며, 200mm FAB 역시 대부분의 측정값이 낮은 수준으로 유지되고 있었다. 이는 절대적 수준에서는 두 FAB 모두 안정적인 작업환경이 유지되고 있음을 의미한다. 그러나 상대적 관점에서 보면, 300mm FAB이 일관되게 더 낮은 노출 특성을 보였고, 이러한 차이는 장비 밀폐, 공정 자동화 수준, 이송 시스템(Foup, OHT 등), 공조 구조 등의 설비·운영상 구조가 실제 노출 저감에 영향을 미쳤음을 시사한다.

공정별 분석에서는 Etch, Diffusion, Cleaning(C&C) 공정에서 200mm FAB이 3.9배~8.0배에 이르는 상대위험도를 보였으며, 이는 공정별 화학물질 사용 특성보다는 FAB의 설비 구조 및 오염원과 작업자 간 물리적 거리 확보의 여부와 같은 공간적 차이가 주요한 설명 요인일 가능성을 보여준다. 200mm FAB은 공정 장비와 부대설비가 수평적으로 배치된 2층 구조로 구성되어 있

어, 유해물질의 클린룸 유입 가능성이 높고, 작업자와 오염원 간 거리가 상대적으로 짧다. 반면, 300mm FAB은 상·하부 공간이 분리된 3층 구조(FAB-CSF-FSF)를 바탕으로 유해물질의 체류 및 확산 경로가 차단되며, 작업자와의 직접 접촉 가능성이 낮아지는 구조적 이점이 있다.

직무별 분석에서도 이와 유사한 양상이 나타났다. 운영직무에서는 200mm FAB에서 유해물질 검출률이 18.9%로, 300mm FAB의 5.7%에 비해 유의하게 높은 수준이었다($p < 0.001$). 반면, 유지보수직무에서는 양 FAB 간 통계적 유의차가 확인되지 않았다. 300mm FAB에서의 유지보수 측정 건수가 훨씬 많았음에도 불구하고 유사한 검출률을 보인 점은, 유지보수 작업이 장비 개방, 배관 해체, 잔류 화학물 제거 등 물리적 개입을 수반하는 작업 특성으로 인해 밀폐 구조 여부와 관계없이 일정 수준 이상의 노출 가능성을 내포함을 시사한다.

CMR 물질에 대한 노출 차이도 주목할 만하다. KOSHA 기준에 따라 분류된 12종의 CMR(Carcinogenicity, Mutagenicity, Reproductive toxicity) 물질에 대해 검출률을 비교한 결과, 200mm FAB에서는 3.6%, 300mm FAB에서는 0.5%로, 200mm FAB이 약 7.2배 더 높은 수준을 보였다. 포름알데히드(Carc. 1B, Muta. 2)의 경우에는 200mm FAB에서 70.0%, 300mm FAB에서 39.3%의 검출률이 확인되었다. 다만, 측정된 포름알데히드 농도는 WHO 실내공기질 기준인 0.1 mg/m^3 (약 0.08 ppm, 30분 평균)에 비해 현저히 낮아, 고유해성 물질이라 하더라도 절대 농도 기준에서는 충분히 관리되고 있음을 의미한다. 이러한 결과는 구조적·운영상 개선이 단순 농도 감소에만 그치지 않고, 건강 위해 요소의 실질적 저감에도 기여했음을 뒷받침한다.

본 연구는 또한, KOSHA 기준을 기반으로 유해물질 및 CMR 물질의 분류를 수행하고, 각 물질의 검출한계(LOD) 및 ECHA 분류 정보를 부록에 수록함

으로써, 향후 제도적 개선 또는 국제 비교 분석의 기초자료로 활용될 수 있는 기반을 마련하였다. 특히 Detection Difference의 개념은 단순 비율 차이를 백분율 포인트(%p)로 직관화하여 ND 환경에서도 차이를 명확히 도출할 수 있는 지표로 기능하였다.

본 연구는 몇 가지 제한점을 가진다. 첫째, 분석에 사용된 작업환경측정 데이터는 정해진 시기·장소에서 1회성으로 측정된 결과이기 때문에, 근로자의 실제 노출 패턴(예: 일중 변동, 누적 노출량)을 온전히 반영하지 못하는 한계가 있다. 둘째, 측정대상 물질이 관리대상 중심으로 선별되어 있어, 실제 공정에서 사용되는 전체 물질 스펙트럼을 포괄하지 못할 수 있다. 특히 복합 노출 환경에서는 상호작용 효과가 존재할 수 있으나, 본 연구는 이를 반영하지 않았다. 셋째, 노출 수준과 건강영향 간 인과관계를 분석하기 위한 건강검진자료나 코호트 정보는 포함되지 않아, 건강영향에 대한 해석에는 제한이 따른다. 마지막으로, 구조적·설비적 차이를 명확히 정의하기 위한 CFD 분석이나 미세 환경 측정이 병행되지 못했기 때문에, 설비구조가 노출 저감에 어떻게 기여하는지에 대한 정량적 설명은 간접적인 지표에 의존할 수밖에 없었다.

이러한 제한에도 불구하고, 본 연구는 구조 전환 이후의 반도체 FAB 환경에서 유해물질 노출 특성을 실측 기반으로 정량 분석한 선행 사례로서 의미가 있다. 향후에는 실시간 노출 측정, CFD 기반 구조 시뮬레이션, 장기 추적코호트 연구 등과의 연계를 통해, 설비 구조·운영상 변화가 근로자 건강에 미치는 영향을 보다 정밀하게 규명할 필요가 있다. 특히 FAB 구조 설계 및 공정 개발 초기 단계에서 건강영향 기반의 유해물질 우선순위를 반영하는 선제적 관리 체계가 정착된다면, 반도체 산업의 지속가능한 안전보건 체계 구축에 기여할 수 있을 것이다.

V. 결론

본 연구는 반도체 산업 내 200mm FAB과 300mm FAB에서 수행된 총 11,703건의 작업환경측정 데이터를 기반으로, FAB 구조 및 자동화 수준의 차이가 유해물질 노출 특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

분석 결과, 300mm FAB은 Etch, C&C, Diffusion 등 주요 공정에서 200mm FAB 대비 유의하게 낮은 유해물질 검출률을 보였으며, 모든 측정값이 작업환경 허용기준(OEL)의 5% 미만으로 관리되고 있었다. 특히 CMR 물질 7종에서 200mm FAB 대비 90% 이상 낮은 검출률을 보여, 구조적·운영상 개선이 건강 위해 요인을 실질적으로 저감할 수 있음을 확인하였다.

또한 ND(None Detected) 사례가 많은 반도체 환경의 특성을 고려하여, 단순 평균 외에도 Detection Difference, Fisher's Exact Test, 상대위험도 등의 지표를 활용한 다차원적 분석이 가능함을 입증하였다. 이를 통해 실측 기반 정량평가의 현실적 한계를 보완하고, 고유해성 물질 중심의 비교·평가 방법론을 제시하였다.

본 연구는 300mm FAB 구조의 고도 밀폐화, 자동화된 웨이퍼 이송 시스템, 수직적 설비 분리 구조가 실제 노출 수준 저감에 기여할 수 있음을 실증적으로 제시하였으며, 이는 건강영향 기반 FAB 설계의 필요성과 효과를 뒷받침하는 결과로 볼 수 있다.

한편, 본 연구는 구조와 설비가 다른 두 FAB 간 상대적 비교를 중심으로 하였기 때문에, 200mm FAB 자체가 고위험 환경이라는 단정은 불가능하다. 실제로 200mm FAB에서도 전체 측정값의 99% 이상이 OEL 5% 미만으로 관

리되고 있었고, OEL 10% 초과 사례는 1건에 불과하였다.

향후 연구에서는 FAB 구조 전환 전·후의 건강영향을 명확히 검토할 수 있도록, 장기 추적 기반의 전향적 코호트 연구, 실시간 측정 기술, CFD 기반 공조 시뮬레이션 등의 기법이 필요하다. 또한, 복합노출, 순간 고노출, CMR 물질의 누적노출과 같은 리스크를 반영할 수 있는 제도 개선도 병행되어야 한다.

결론적으로, 본 연구는 FAB 구조 및 자동화 수준의 변화가 유해물질 노출 특성에 실질적 영향을 미칠 수 있음을 정량적으로 입증하였으며, 반도체 산업의 건강영향 기반 설계 및 안전보건 전략 수립에 실질적 근거 자료로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

김은아, 이상길, 서희경, 전교연, 박순우. 반도체 제조공정 근로자에 대한 건강 실태 역학조사. 산업안전보건연구원, 2019

최광민, 이지은, 조귀영, 김관식, 조수현, 반도체 웨이퍼 제조공정 클린룸 구조, 공기조화 및 오염제어시스템, 한국산업보건학회지 2015: 25(2): 202-210

박승현, 정은교, 신정아, 이광용, 박해동, 이나루, 박현희, 권지운, 서희경, 김갑배, 정광재. 반도체 제조 사업장에 종사하는 근로자의 작업환경 및 유해요인 노출특성 연구. 산업안전보건연구원, 2012

박동욱, 윤충식, 반도체 근로자 질병의 직무관련 논란으로 본 우리나라 산업위생 활동 개선방향, 한국산업보건학회지 2012.22(1)1-8.

박동욱, 반도체 산업 노동자 암 발생 위험 논란과 과제, 한국산업보건학회지 2019: 29(3): 278-288

고용노동부. 고시 제2025-7호, 화학물질의 분류 및 표시 등에 관한 규정, 2025

고용노동부, 고시 제2020-48호, 화학물질 및 물리적인자의 노출 기준, 2020

안전보건공단, KOSHA GUIDE H-89-2021 유해물질 작업환경측정 기준, 2021

산업통상자원부, 반도체 초격차 전략 2.0, 보도자료, 2024

MacGibbon, D. (2000). Semiconductor industrial hygiene. In Patty's Industrial Hygiene.

Park, J. et al. (2011). Characteristics of VOCs in semiconductor processes. Korean Journal of Occupational Health.

Lee, S. et al. (2011). Evaluation of chemical exposure in clean room environments. Annals of Occupational and Environmental Medicine.

Park, H. et al. (2018). Assessment of chemical exposure in semiconductor FABs by process type. Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene.

Park, H. et al. (2019). Exposure characteristics by equipment structure in semiconductor FABs. Environmental Health and Toxicology.

DeGiorgio, G. (2002). 300 mm wafer technology: Opportunities and challenges. Semiconductor International.

Wang, L. et al. (2004). Automation in 300 mm wafer fabs. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing.

TSMC (2007). Advanced manufacturing technologies for 300 mm FABs. Company Report.

Chung, H. et al. (2012). Occupational leukemia in semiconductor workers. Korean Journal of Occupational Medicine.

Lee, J. et al. (2023). A study on hematologic malignancies in semiconductor

production workers. *Annals of Occupational and Environmental Research*.

Schenker, M.B. et al. (1995). Reproductive outcomes in female semiconductor workers. *American Journal of Industrial Medicine*.

Kim, H. et al. (2011). Limitations of workplace monitoring in semiconductor industries. *Korean Journal of Industrial Hygiene*.

OSHA (2021). Occupational exposure limits for isopropyl alcohol. U.S. Department of Labor.

EPA (2015). Risk assessment for N-Methylpyrrolidone (NMP). U.S. Environmental Protection Agency.

IARC (2020). Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans. International Agency for Research on Cancer.

NIOSH (2003). NIOSH Manual of ANALYTICAL Methods, 4th Edition, U.S. Department of Health and Human Services, CDC.

OSHA (2006). OSHA Sampling and Analytical Methods, U.S. Department of Labor.

European Chemicals Agency (ECHA). (2024). Harmonised classification and labelling – Annex VI to CLP Regulation.

ACGIH (2023). Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

부 록

본 부록은 본문 분석에 포함된 48종 유해화학물질의 물질명, CAS 번호, 노출기준, 측정건수 및 검출건수, 최대값, 검출한계(LOD)와 KOSHA 및 ECHA 기준에 따른 발암성(C), 생식독성(R), 변이원성(M) 분류 정보를 정리한 것이다. 물질별 CMR 분류는 산업안전보건공단 고시(2024년 기준) 및 ECHA CLP Annex VI(화학물질 분류·표지·포장 규정)에 근거하였다.

Appendix Table 1. 200mm 및 300mm FAB 대상 유해화학물질의 측정정보 및 KOSHA/ECHA CMR 분류

Substance Name	CAS No.	Max 200mm	Max 300mm	Unit	OEL	LOD	K_ C	K_ M	K_ R	E_ C	E_ M	E_ R
Sulfuric acid (pH ≤ 2.0)	7664-93-9	0.0084	0	mg/m ³	0.2	0.00002	1A (inh.)	-	-	-	-	-
Arsenic and its inorganic compounds	7440-38-2	0.00011	0	mg/m ³	0.01	0.00142	1A	-	-	1A	-	-
Pyridine	110-86-1	0	0	ppm	2	0.0176	-	-	-	-	-	-
Antimony trioxide	1309-64-4	0.00012	0	mg/m ³	0.5	0.00142	2	-	-	2	-	-
Nickel and its compounds	7440-02-0	0	0	mg/m ³	0.1	0.00039	1A	-	2	1A	2	1B
Formaldehyde	50-00-0	0.0163	0.0077	ppm	0.3	0.00002	1B	2	-	1B	2	-
Hydrogen peroxide	7722-84-1	0.0251	0	ppm	1	0.00001	-	-	-	-	-	-
1,4-Dioxane	123-91-1	0.6359	0	ppm	20	0.03778	2	-	-	2	-	-
Methyl n-amyl ketone	110-43-0	0	0	ppm	50	0.01665	-	-	-	-	-	-

Substance Name	CAS No.	Max 200mm	Max 300mm	Unit	OEL	LOD	K_ C	K_ M	K_ R	E_ C	E_ M	E_ R
2-Ethoxyethanol	110-80-5	0	0	ppm	5	0.52754	-	-	1B	-	-	1B
Phenol	108-95-2	0	0	ppm	5	0.20784	-	-	-	-	-	-
Ozone	10028-15-6	0.008	0	ppm	0.08	0.00007	-	-	-	-	-	-
1,2-Dichloroethyl ene	540-59-0	1.624	0	ppm	200	0.00525	-	-	-	-	-	-
2-Hexanone	110-43-0	0	0	ppm	50	0.01665	-	-	-	-	-	-
N,N-Dimethylace tamide	127-19-5	0	0	ppm	10	0.00995	-	-	1B	-	-	1B
Copper and its compounds	7440-50-8	0	0.0093	mg/m ³	1	0.00011	-	-	-	-	-	-
Normal butyl acetate	123-86-4	0	0	ppm	150	0.01111	-	-	-	-	-	-
Methyl alcohol (Methanol)	67-56-1	0	0	ppm	200	0.19714	-	-	2	-	-	2
Fluorine	7782-41-4	0.0021	0	ppm	0.1	0.00002	-	-	-	-	-	-

Substance Name	CAS No.	Max 200mm	Max 300mm	Unit	OEL	LOD	K_ C	K_ M	K_R	E_C	E_M	E_R
Hydrogen fluoride (Ceiling)	7664-39-3	0.0777	0	Cppm	3	0.00017	-	-	-	-	-	-
Hydrogen fluoride	7664-39-3	0.0103	0	ppm	0.5	0.00017	-	-	-	-	-	-
Hydrogen bromide	10035-10-6	0	0.0015	Cppm	2	0.00003	-	-	-	-	-	-
Arsine (AsH ₃)	7784-42-1	0.00004	0	ppm	0.005	0.000005	1A	-	-	1A	-	-
Potassium hydroxide	1310-58-3	0.0111	0.0009	Cmg/m ³	2	0.004	-	-	-	-	-	-
Cyclohexanone	108-94-1	0	0	ppm	25	0.00969	-	-	2	-	-	2
Acetone	67-64-1	0	0	ppm	500	0.04561	-	-	-	-	-	-
Aluminum and its compounds	7429-90-5	0.00179	0.0304	mg/m ³	2	0.00043	-	-	-	-	-	-
Ammonia	7664-41-7	0.1179	0.3242	ppm	25	0.00012	-	-	-	-	-	-
Ethanolamine	141-43-5	0	0	ppm	3	0.01335	-	-	-	-	-	-

Substance Name	CAS No.	Max 200mm	Max 300mm	Unit	OEL	LOD	K_ C	K_ M	K_ R	E_ C	E_ M	E_ R
Hydrochloric acid	7647-01-0	0.0123	0.0083	ppm	1	0.000055	-	-	-	-	-	-
Chlorine	7782-50-5	0.0038	0.0014	ppm	0.5	0.00002	-	-	-	-	-	-
Isopropyl alcohol	67-63-0	2.3476	0.868	ppm	200	0.0062	-	-	-	-	-	-
Phosphoric acid	7664-38-2	0	0.0039	mg/m ³	1	0.000085	-	-	-	-	-	-
Nitric oxide	10102-43-9	0	0.003	ppm	25	0.000685	-	-	-	-	-	-
Carbon monoxide	630-08-0	0	0	ppm	30	Direct reading	-	-	-	-	-	-
Zirconium and its compounds	7440-67-7	0	0.0006	mg/m ³	5	0.00011	-	-	-	-	-	-
Nitric acid	7697-37-2	0.0129	0.0105	ppm	2	0.00004	-	-	-	-	-	-
Acetic acid	64-19-7	0	0	ppm	10	0.04665	-	-	-	-	-	-
Cobalt and its inorganic compounds	7440-48-4	0	0.0003	mg/m ³	0.02	0.00064	1B	-	1B	1B	-	1B

Substance Name	CAS No.	Max 200mm	Max 300mm	Unit	OEL	LOD	K_ C	K_ M	K_ R	E_ C	E_ M	E_ R
Cresol	1319-77-3	0	0	mg/m ³	22	0.7	-	-	-	-	-	-
Ethylene glycol	107-21-1	0	0	Cmg/m ³	100	1.84	-	-	-	-	-	-
Tungsten and its compounds	7440-33-7	0.00023	0.0015	mg/m ³	1	0.00039	-	-	-	-	-	-
Phosphine	7803-51-2	0.0002	0	ppm	0.3	0.00002	-	-	-	-	-	-
Silver	7440-22-4	0	0.0001	mg/m ³	0.01	0.000011	-	-	-	-	-	-
Titanium dioxide	13463-67- 7	0	0	mg/m ³	10	0.00047	2(inh.)	-	-	2(inh.)	-	-
Indium and its compounds	7440-74-6	0.00006	0	mg/m ³	0.01	0.00012	-	-	-	-	-	-
Ethyl silicate	78-10-04	0	0	ppm	10	0.0215	-	-	-	-	-	-
Nitrogen dioxide (NO ₂)	10102-43- 9	0	0	ppm	25	0.0001	-	-	-	-	-	-

***Abbreviations:**

K_C, K_M, K_R: Classification based on KOSHA standards for Carcinogenicity, Mutagenicity, and Reproductive toxicity, respectively.

E_C, E_M, E_R: Classification based on ECHA CLP Annex VI for CMR (Carcinogenic, Mutagenic, Reprotoxic) substances.

OEL (Occupational Exposure Limit): Exposure limits set by the Ministry of Employment and Labor (Korea).

CAS No. (Chemical Abstracts Service Number): Unique identifier assigned to each chemical substance.

LOD (Limit of Detection): The minimum concentration detectable by analytical methods under specified conditions.

In this study, LOD values were converted into air concentration units (e.g., mg/m³ or ppb) and are presented for reference.

Both KOSHA and ECHA classify CMR substances using the following system:

Category 1A: Known to be carcinogenic to humans (based on human data)

Category 1B: Presumed human carcinogen (based on animal data)

Category 2: Suspected human carcinogen (limited evidence from animal or human studies)

Appendix Table 2. 유의 물질 6종 OR 및 95% 신뢰구간 요약

Chemical	OR	95% CI (Lower – Upper)	p-value
Formaldehyde	3.61	1.71 – 7.59	0.0007
KOH	28.86	7.36 – 114.20	<0.0001
Ammonia	3.04	1.41 – 6.28	0.0047
Chlorine	17.45	5.80 – 49.87	<0.0001
IPA	43.23	18.69 – 104.31	<0.0001
Nitric acid	3.75	1.59 – 8.93	0.0034

ABSTRACT

A Comparative Study on Hazardous Substance Exposure Characteristics Among Workers in 200mm and 300mm Semiconductor Fabs

jeongseon Kim

Graduate School of Public Health

Yonsei University

(Directed by Professor Jinah Yoon, M.D., Ph.D.)

Semiconductor manufacturing process involves the use of various hazardous chemicals in a highly clean and precise environment, where exposure characteristics can vary significantly depending on the structural design and automation level of the facility. Although the recently adopted 300mm fabrication facility (FAB) has improved equipment enclosure and automation, empirical data comparing its exposure characteristics with those of the conventional 200mm FAB remain limited.

This study quantitatively compared the occupational exposure characteristics between 200mm and 300mm FABs using 11,703 industrial hygiene measurements collected from 2021 to 2023 within a single company. Exposure data were categorized by process type, job type, and exposure levels based on the Occupational Exposure Limits (OELs) stipulated by the Korean Ministry of Employment and Labor, and analyzed using detection rate, relative risk (RR), detection difference (DD), and Fisher's Exact Test to assess statistical significance. Given the high prevalence of non-detects (ND) in semiconductor work

environments, advanced statistical methods beyond simple mean comparison were applied to ensure accurate interpretation.

The analysis revealed that the 300mm FAB exhibited significantly lower detection rates than the 200mm FAB across most processes and job types. Notably, the Etch, Diffusion, and Cleaning & Conditioning (C&C) processes demonstrated over 70% reduction in exposure. The average detection rate was 18.3% in the 200mm FAB and 5.4% in the 300mm FAB, with 13 substances showing statistically significant differences ($p < 0.05$). For high-hazard substances classified as carcinogenic, mutagenic, or reprotoxic (CMR) under KOSHA (Korea Occupational Safety and Health Agency) standards, the detection rate was 3.6% in the 200mm FAB and 0.5% in the 300mm FAB, indicating a substantial structural impact on high-toxicity chemical exposure.

Job-type comparison showed that the operator group had significantly lower exposure in the 300mm FAB, while no meaningful difference was observed in the maintenance group, where equipment access and enclosure breach are frequent. These findings highlight the need for targeted engineering controls in maintenance tasks. By applying robust analytical methods to overcome the limitations of ND-dominant data, this study presents a validated framework for assessing relative exposure characteristics between FAB generations. The results offer practical implications for semiconductor FAB design, hazardous substance management, and worker health protection from an occupational health perspective.

Keywords: Semiconductor manufacturing, chemical exposure, occupational hygiene, 200mm FAB, 300mm FAB, Detection Difference, CMR substances, Fisher's Exact Test