

배기덕트 청소 작업자의 작업환경 실태 평가 사례

오세철¹ · 김기연^{1,2*}

¹서울과학기술대학교 융합과학대학원, ²서울과학기술대학교 안전공학과

Case Study on Assessment of Work Environment Status for Workers Cleaning Contaminants in Exhaust Duct

Sechul Oh¹ · Ki Youn Kim^{1,2*}

¹Convergence Science, Seoul National University of Science and Technology

²Department of Safety Engineering, Seoul national University of Science and Technology

ABSTRACT

Objectives: Work environment for workers cleaning contaminants in exhaust duct was analyzed and workers exposed level of hazardous factors were estimated.

Methods: A total of four factors: "gas, noise, dust and personal protection equipment" were analyzed to evaluate the risk of the working environment. This study was applied to the site where cleaning duct in semiconductor manufacturing plant. The working environment was measured for two workers cleaning contaminants in exhaust duct.

Results: As a result of investigating chemical factors, gaseous matters including ammonia and benzene were detected, but they were measured less than the TWA limit. In noise case, it was founded that the noise was operated below the upper limit. Dust was also found to be insufficient than the TWA limit, the same as gaseous substances. Finally, as a result of investigating the status of PPE use, it was operated more strictly than PPE selection criteria based on KOSHA guideline.

Conclusions: In order to create a safe workplace for workers, work environment was regularly measured, and as a result of measuring exposed levels of gaseous matters, noise, they were stably maintained below the upper limit.

Key words: Work environment, gaseous matters, noise, dust, personal protection equipment

I. 조사 개요

반도체 제조 공정은 많은 종류의 가스와 케미컬을 사용하며, 잔류 물질은 실내로 확산되지 않도록 공기정화 시스템으로 배출되어 제거된다(Choi et al., 2015). 대기오염물질은 대기오염의 원인이 되는 가스, 입자상물질 등 총 64종으로 분류되고, 유해성 대기 감시 물질을 지정하여 지속적인 측정이나 감시나 관찰들이 필요하다


고 인정되는 물질로 정의하였다. 이 중 사람의 건강, 재산이나 동식물의 생육에 직접 또는 간접으로 위해를 끼칠 수 있어 대기 배출에 대한 관리가 필요하다고 인정되는 물질 등 총 35종을 특정대기유해물질을 환경부령으로 정하여 관리한다(MOE, 2020).

대기오염물질 중 입자상 물질은 공기정화시스템으로 배출되는 과정에서 배기 덕트에 적체되는 현상이 발생한다. 옥내에서 옥외로 구성된 배기덕트는 굴곡부를 포

*Corresponding author: Ki-Youn Kim, Tel: 02-970-6376, E-mail: kky5@seoultech.ac.kr
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811

Received: October 25, 2024, Revised: December 11, 2024, Accepted: December 26, 2024

 Sechul Oh <http://orcid.org/>

 Ki-Youn Kim <http://orcid.org/0000-0001-6889-8548>

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.

함하고 있으며, 배기 기류가 소용돌이치는 구간이 있어 입자상 물질의 배출을 방해하는 요인으로 작용한다. 배기덕트 굴곡부의 유동해석 결과에 따르면 배기덕트 내부에 배기 유속이 급격히 하락하는 국부적 공간이 있고 입자상 물질이 이 구간을 통과할 때 배기덕트에 적체된다(Zmrhal & Schwarzer, 2009).

반도체 제조공정 중 diffusion, 화학기상증착(chemical vapor deposition, CVD), CMP(chemical mechanical polishing), etch 공정은 입자상 물질을 배출하는 대표적인 공정이다. 반도체는 실리콘 기판 표면에 트랜지스터나 다이오드 등의 소자와 금속 배선을 생성하여 만들어지므로 SiO_2 금속산화물이 배출된다. 그 밖에 TiO_2 , Al_2O_3 , 삼산화텅스텐(WO_3)등의 금속산화물 형태의 입자상 물질도 배출된다. 반도체의 금속 배선 선폴이 미세화됨에 따라 기존의 알루미늄으로는 성능 구현이 불가능해서 신규 개발된 CVD 공정에서 전구체로 사용되는 육불화텅스텐(WF_6) 및 텅스텐(W)은 미량의 수분 및 산소와 반응시 WO_3 가 생성된다.

반도체 제조설비에서 사용되는 가스 및 케미컬의 잔류 물질을 공기정화시스템으로 원활히 배출하기 위해서 배기 압력을 일정하게 유지하는 것이 요구된다. 그러나 배기덕트 내부에 적체된 입자상 물질은 배기 압력을 하락시켜 대기오염물질의 배출을 방해하는 요인으로 작용하므로 배기덕트 내부 청소작업이 필요하다. 반도체 공장은 365일 24시간 연속 가동되므로 공기정화시스템을 정지시키고 청소작업을 할 수 없기 때문에 배기덕트에 설치된 점검구를 통해 입자상 물질을 배기덕트 외부로

꺼내는 형태로 청소작업을 실시하는 등 작업자에 의한 수작업으로 청소작업이 이루어진다. 이 경우 작업자의 대기오염물질 및 작업환경 내에서의 유해인자 노출을 예방하기 위하여 방독마스크, 내화학복, 내화학장갑 등과 같은 개인 안전 보호구를 착용하고 청소작업을 실시한다(MOE, 2018). 따라서 본 연구의 목적은 입자상 물질 청소작업 환경의 유해요인을 파악하고 개인 안전 보호구의 적합성을 평가하여 근로자의 산업위생 환경을 진단하는 데 있다.

II. 조사 방법

1. 배기덕트 청소 작업

본 연구의 조사 대상인 반도체 제조 사업장의 경우 배기덕트 내부의 오염물질 청소작업은 옥외에서 시행되며 청소작업자 2명, 안전관리자 1명, 작업관리자 1명 등 총 4명으로 구성되었다. 작업 전 안전관리자는 작업 구획을 설정하여 안전펜스 등으로 일반인의 접근을 제한하고, 작업 위치 주변 잠재 위험을 선행 점검한다. 일단, 작업구역이 확보되면 청소작업자 2명은 개인 안전 보호구를 착용한다. 개인 안전 보호구는 전면형 방독마스크, 전신형 내화학복, 내화학 장화, 내화학 장갑 등을 착용하고 각각의 안전 보호구가 겹치는 구간의 틈새에는 내화학 테이프를 부착하여 유해 물질이 틈새로 스며들어 노출되는 위험을 예방한다(KOSHA, 2020). 안전관리자는 작업장 주변의 조도를 측정하여 보통작업 기준 150 Lux 이상 유무를 확인한다. 총 소요되는 작업

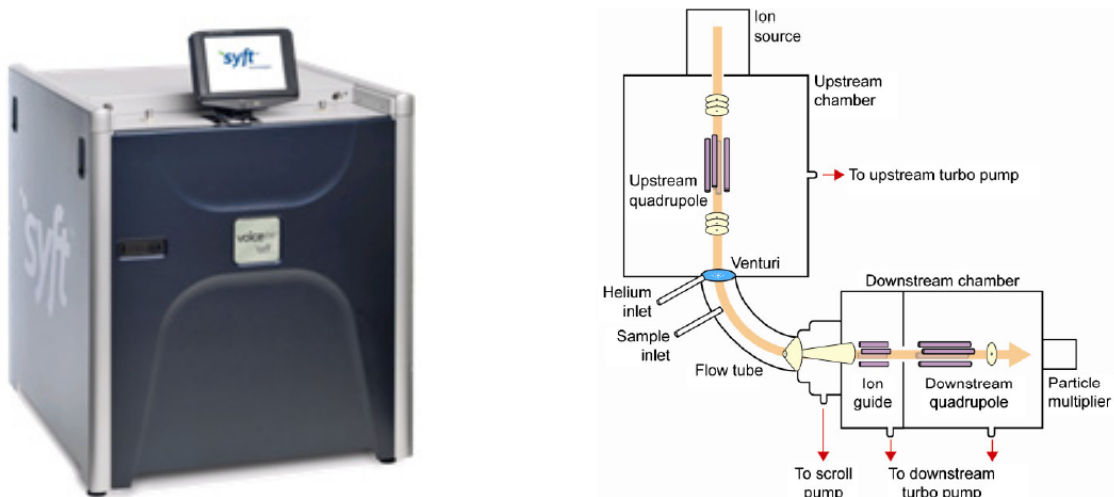


Figure 1. Sampling and analysis principle of SIFT-MS

시간은 1~2시간 미만이므로 6시간 이상 연속 작업환경 측정은 불가한 상황으로 시간당 4회 등 간격으로 측정한다.

2. 작업환경 측정대상 유해인자

본 사업장의 작업환경측정 대상인 가스상 물질들은 작업 중 작업자의 호흡기 반경 30cm 이내에서 공기 시료를 포집하여 총 36가지의 유해인자 측정 여부 및 허용기준의 초과 여부 등을 평가하였다. 작업자 주위에서 포집된 공기 시료는 다중이온 선택형 질량분석기(selected ion flow tube - mass spectrometry, SIFT-MS)(〈Figure 1〉 참조)를 활용하여 절대 질량을 측정하여 유해인자 노출 수준을 평가하였다.

또한 본 사업장의 작업환경측정 대상 물리적 인자는 소음이다. 본 연구에서는 소음 수준을 측정하여 작업환경의 개선 필요성을 집중적으로 평가하였다. 청소작업은 1~2시간 미만에 종료되는 조건이고, 특정 소음원으로 인한 단기 노출 특성이 없어 일정한 소음 수준을 유지하는 구간이므로 시간가중평균을 고려할 수 없어, 연속 소음발생 특성을 고려하여 1시간 동안 등간격으로 총 4차례를 3회씩 측정한 결과를 평균하여 작업환경을 모니터링하였다(KOSHA, 2016).

분진의 경우 배기덕트 내부의 오염물질을 외부로 꺼내는 작업을 실시하는 동안 입자상 물질 시료 채취 장비(AST-MS)를 이용하여 측정하였다. 작업시간이 1~2시간 미만 작업으로 15분간 연속 측정하고 1시간 간격으로 4회 이상 측정해야 하는 조건을 만족할 수 없어 15분간 1회를 측정하고 총 분진량은 중량측정법을 활용하여 측정하였다.

III. 조사 결과

1. 작업환경측정 결과

1) 가스상 물질

〈Table 1〉에 제시된 바와 같이 분석대상 36가지 유해인자 모두 시간가중평균노출기준(Time Weighted Average, TWA) 미만인 것으로 조사되었다. 주요 가스상 물질인 1,3-butadiene, dichloromethane, methanol, toluene, trichloroethene 등은 노출 수준이 노출기준 대비 0.01% 미만이었으며, 가장 높게 측정된 물질은 benzene과 ammonia였으나, 이 역시 노출기준 대비 각각 0.6%와 0.9%로 노출 수준이 매우 낮았다.

2) 소음

배기덕트 청소작업은 1~2시간 미만에 종료되었으며, 작업 현장 주변에는 특정 시설로 인한 충격소음이 확인되지 않았다. 따라서, 시간가중평균을 고려할 수 없는 조건을 고려하여 등간격으로 소음을 측정하고 이를 평균하여 TWA값으로 산출하였다. 청소작업 시작 시점부터 15분 간격으로 작업자 반경 30cm 이내에서 지시 소음계로 소음을 측정했다. 작업 공간 주위에서의 소음을 측정한 결과, 작업자 #A는 평균 72.6 dB(A), 작업자 #B는 평균 73.4 dB(A) 노출 수준이 확인되었다. 1일 8시간 시간가중평균 소음의 노출기준 90 dB(A) 수준 미만으로 운영되고 있어 노출 수준이 미비했다(〈Table 2〉 참조).

3) 분진

작업시간이 1~2시간 미만 작업이므로 15분간 측정하고 1시간 간격으로 4회 이상 측정해야 하는 조건을 만족할 수 없었다. 따라서 15분간 1회를 측정하였으며 총 분진량은 중량측정법을 적용한 결과, 약 0.1 mg/m³ 노출 수준으로 측정되었다.

2. 보호구 착용 실태 평가

1) 호흡 보호구 선정

호흡 보호구는 작업 형태에 따라 방진마스크, 방독마스크, 송기마스크, 공기호흡기 등 다양하다. 배기 덕트 내부의 오염물질을 청소하는 작업이므로 입자상 물질 및 가스상 물질의 흡입 독성 위험이 있다. 작업 현장에서는 전면형 방독마스크, 복합가스 카트리지, 분진 필터를 사용하고 있었다. 화학적 인자 및 분진의 작업환경 측정 결과를 고려할 때, 화학적 인자의 최대 노출 수준은 0.9% 수준 미만이고, 분진의 최대 노출 수준도 5% 미만으로 측정되었으므로 작업 현장의 호흡 보호구는 작업자의 안전을 고려하여 적합하게 운영되고 있다고 할 수 있다.

2) 보호복 선정

내화학 보호의는 Dupont社 Tychem F 전신 보호복을 사용하고 있었다. 한국산업안전보건공단 안전인증을 획득한 4형식 전신보호복으로 분무 차단 성능을 갖는 보호복이다. 특히, 화학적 유해인자의 노출에 대비하기 위해서 보호복의 선정은 매우 중요하다. 작업환경측정 결과를 고려 시 노출 수준이 최대 0.9% 미만이므로

Table 1. Measurement results of gaseous pollutants

	Measurement substance	TWA (ppm)	STEL (ppm)	Worker #A (ppm)	Worker #B (ppm)
1	1-Butanol	100	–	0.004	0.007
2	1-Methoxy-2-propanol	100	150	0.003	0.002
3	1-Methoxy-2-propyl acetate	50	100	0.005	0.001
4	1,3-Butadiene	2	10	0.000	0.000
5	2-Propanol	200	400	0.239	0.023
6	Acetaldehyde	50	150	0.159	0.166
7	Acetic acid	10	15	0.027	0.012
8	Acetone	500	750	0.034	0.029
9	Ammonia	25	35	0.234	0.141
10	Benzene	1	5	0.006	0.003
11	Butanone	200	300	0.009	0.004
12	Butyl acetate	150	200	0.001	0.001
13	Cresol	5	–	0.002	0.001
14	Cyclohexanone	25	–	0.001	0.001
15	Dichloromethane	1000	–	0.011	0.008
16	Dimethyl disulfide	0.5	–	0.002	0.000
17	Ethanol	1000	–	0.047	0.167
18	Ethylene glycol	–	40	0.015	0.009
19	Hydrogen sulfide	10	15	0.013	0.009
20	Isobutyl alcohol	50	–	0.003	0.006
21	Isoprene	2	750	0.000	0.000
22	m-xylene	100	150	0.101	0.002
23	methanol	200	250	0.082	0.026
24	methyl iodide	2	–	0.000	0.000
25	methyl isobutyl ketone	50	75	0.002	0.001
26	methyl mercaptan	0.5	–	0.001	0.002
27	naphthalene	10	15	0.001	0.001
28	pentanal	50	–	0.002	0.002
29	phenol	5	–	0.001	0.000
30	phosphine	0.3	1	0.001	0.001
31	propanoic acid	10	15	0.002	0.002
32	styrene	20	40	0.000	0.000
33	tetrahydrofuran	200	250	0.004	0.011
34	toluene	50	150	0.007	0.003
35	trichloroethene	10	–	0.000	0.000
36	trimethyl amine	5	15	0.015	0.013

Table 2. Noise levels measured in the workplace

Measurement time	Worker #A			Worker #B		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
09:00	68.3	70.2	76.3	74.6	78.8	65.0
09:15	68.9	73.8	73.0	74.1	78.2	74.5
09:30	78.9	65.5	69.9	72.6	81.9	77.7
09:45	82.2	67.2	74.6	65.7	74.4	61.5
10:00	73.6	72.1	76.5	84.1	78.3	64.0
10:15	63.7	78.5	73.8	75.4	71.0	70.1
Mean		72.6			73.4	

상기 보호의로 작업자의 안전을 충분히 확보하고 있음을 알 수 있었다.

3) 기타

그 밖에 내화학 장갑은 Ansell社 알파텍 87-224 제품을 사용하고 있고, 내화학 장화는 대신화학社 DS-내화학-01 제품을 사용하고 있다. 상기 제품들도 한국산업안전보건공단 안전인증을 획득한 제품으로 유해물질의 접촉에 대비하여 안전하게 운영되고 있었다. 아울러 내화학 테이프를 내화학 장갑, 내화학 장화, 전면형 방독마스크가 내화학 보호의와 연결되는 부분에 이중으로 접합처리하여 이음매로 유해물질이 보호의 내부로 유입되는 2차 사고를 예방할 수 있도록 운영되고 있었다.

IV. 고찰 및 결론

본 연구에서는 배기덕트 내부의 오염물질을 청소하는 노동자의 작업환경을 3가지 인자 측면에서 측정하여 작업자의 안전성을 검증하였다.

청소작업은 2인 1조로 이루어졌으며, 각각의 작업자 행동 반경 30cm 이내에서 SIFT-MS를 이용하여 공기를 포집하였으며, 총 52종의 물질을 정성적·정량적으로 확인할 수 있었다. 화학적 인자로 검출된 물질은 1,3-butadiene, dichloromethane, methanol, toluene, trichloroethene 등이 있으며, 노출 수준이 0.01% 미만으로 측정되었다. 상대적으로 가장 높게 측정된 물질은 benzene 0.6%, ammonia 0.9% 등이나, 유해인자의 TWA에 미치지 않는 미비한 수준으로 측정되었다.

물리적 인자는 소음, 고열 등을 말한다. 총 작업시간이 1~2시간 미만에 종료되므로 6시간 이상 연속 측정이 불가능한 조건임을 고려하여 15분 간격으로 총 6회를 3회씩 측정했다. 즉, 각각의 작업자는 총 18회 소음 데이터를 확보할 수 있었으며, 본 데이터를 평균하여 노출기준값(TWA)으로 선정하였다. 작업자 #A 주변 소음은 72.6 dB(A), 작업자 #B 주변 소음은 73.4 dB(A) 수준으로 소음 노출 기준 90 dB(A)을 고려할 때 노출 수준은 82%로 작업환경은 안전하다고 할 수 있다.

작업자의 유해인자 노출을 방지하기 위하여 개인안전 보호구를 착용한 후 작업을 실시하고 있었다. 호흡보호구는 전면형 방진/방독마스크를 착용하여 화학적 인자 및 분진 노출에 대비하고 있었으며, 보호복은 4형식 내화학복을 착용하고 있어 가스 및 약품 노출 위험을 대비하였다. 그 밖에 내화학 장화, 내화학 장갑을 착용했으며 내화학복에 겹치는 부분은 내화학 테이프로 이음새로 흘러들어올 수 있는 2차 사고를 예방하고 있었다.

감사의 글

본 연구는 2023년 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 학술용역 지원 사업에 의해 수행되었음.

References

- Choi KM, Jung MK, An HC. Physicochemical characterization of powder byproducts generated from a metallization process and its 1st scrubber in the semiconductor industry. J Kor Soc Occup Environ Hyg 2015;25(3):294~300
- KOSHA. Guideline for selection and use of respirator. KOSHA GUIDE H-82-2020, 2020
- KOSHA. Measurement method of noise in workplace. KOSHA GUIDE W-23-2016, 2016
- Ministry of Environment (MOE). Air Quality Conservation Act. 2020
- Ministry of Environment (MOE). Guide to wearing personal protective equipment for those handling hazardous chemicals. Proc: 11-1480802-000182-14, 2018
- Zmrhal V & Schwarzer J. Numerical simulation of local loss coefficients of ventilation duct fittings. Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland. 2009. p. 1761-1764

<저자정보>

오세철(대학원생), 김기연(교수)