

반도체 산업의 웨이퍼 가공 공정 유해인자 고찰과 활용 - 화학물질과 방사선 노출을 중심으로 -

박동욱*

한국방송통신대학교 환경보건학과

Review of Hazardous Agent Level in Wafer Fabrication Operation Focusing on Exposure to Chemicals and Radiation

Donguk Park*

Department of Environmental Health, Korea National Open University

ABSTRACT

Objectives: The aim of this study is to review the results of exposure to chemicals and to extremely low frequency(ELF) magnetic fields generated in wafer fabrication operations in the semiconductor industry.

Methods: Exposure assessment studies of silicon wafer fab operations in the semiconductor industry were collected through an extensive literature review of articles reported until the end of 2015. The key words used in the literature search were “semiconductor industry”, “wafer fab”, “silicon wafer”, and “clean room,” both singly and in combination. Literature reporting on airborne chemicals and extremely low frequency(ELF) magnetic fields were collected and reviewed.

Results and Conclusions: Major airborne hazardous agents assessed were several organic solvents and ethylene glycol ethers from Photolithography, arsenic from ion implantation and extremely low frequency magnetic fields from the overall fabrication processes. Most exposures to chemicals reported were found to be far below permissible exposure limits(PEL) ($10\% < \text{PEL}$). Most of these results were from operators who handled processes in a well-controlled environment. In conclusion, we found a lack of results on exposure to hazardous agents, including chemicals and radiation, which are insufficient for use in the estimation of past exposure. The results we reviewed should be applied with great caution to associate chronic health effects.

Key words: ELF, retrospective exposure, wafer fabrication operation

I. 서 론

반도체 산업(Semiconductor industry) 핵심 공정은 모래(SiO_2)로부터 실리콘(silicon, Si)을 추출(환원)하여(웨이퍼 제조 공정) 생산된 전기 특성이 없는(부도체) 실리콘 웨이퍼(wafer)에 전기적 특성을 부여하는 것이다. 실리콘 웨이퍼 위에 전기 회로를 만들고(가공(fabrication), 이하 웨이퍼 가공 공정), 회로화된 수많은 작은 칩들(chips)을 개별로 분리하여 제품으로 만

든다(이하 칩 패키지 공정). 화학물질과 에너지가 가장 많이 사용되는 웨이퍼 가공 공정은 제조된 웨이퍼의 산화(oxidation) → 감광액 도포(photolithography resist application) → 노광(photolithography exposure) → 현상(developing) → 식각(etching) → 스트리핑(stripping) → 이온 주입 → 실리콘 증착(epitaxy) → 금속배선을 위한 증착(metallization)이 반복되는 과정이다. 모든 공정에서 건강에 장애를 줄 수 있는 화학물질이 발생되고 에너지가 사용된다.

*Corresponding author: Donguk Park, Tel: 02-3668-4707, E-mail: pdw545@gmail.com

Department of Environmental Health, Korea National Open University, 169 Dongsung-dong, Jongroku, Seoul, 110-791

Received: March 11, 2016, Revised: March 18, 2016, Accepted: March 20, 2016

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.

외국에서 웨이퍼 가공 공정 원리 및 유해인자 종류 및 발생 특성은 잘 보고되어 있지만 모두 2010년 대 이전에 보고된 것들이다(Wald & Jones, 1987; Harrison, 1992). Park et al.(2011a)은 여러 문헌에서 보고된 반도체 웨이퍼 가공 공정의 원리와 공정에서 발생하는 잠재적 유해인자 종류를 문헌 고찰을 통해 종합하였다(Park et al., 2011a). 이 논문에서는 공정에서 발생하는 유해인자 종류와 특성만 설명하고 노출수준은 정리되지 않았다. 반도체 웨이퍼 가공 공정에서 연구된 위험이 큰 유해인자 노출수준을 종합해서 시기, 공정 등 노출 특성별로 노출수준의 변화를 고찰하는 것은 과거 노출을 추정하고 암 등 만성질환의 원인 및 연관을 규명하는 데 많은 도움이 된다.

본 연구에서는 웨이퍼 가공 공정에서 보고된 화학물질과 방사선(radiation) 노출수준을 고찰하고 이에 근거해서 유해인자 노출평가 방향을 제안하였다.

II. 방 법

본 연구는 2015년까지 웨이퍼 가공 공정에서 보고된 유해인자 중 공기 중 화학물질과 자기장 극저주파(extremely low frequency-magnetic field, 이하 극저주파

라 함)의 노출수준을 중심으로 고찰하였다. 관련 문헌을 찾기 위한 주요 검색 용어 중 반도체 산업이나 공정으로 “semiconductor industry”, “fabrication” 또는 “fab”(팩), “chip”(칩)이었고, 유해인자 대상 검색용어는 “chemical”, “radiation”, “ELF”와 “x-ray”로 이들을 단독 또는 조합해서 문헌을 찾았다. 본 문헌에서 공기 중에서 측정한 외부 노출수준 결과를 정리하였다. 주요 검색 사이트는 구글 학술검색(<http://scholar.google.co.kr/>)과 PubMed(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>)였으며 관련문헌이 보고된 저널에서 필요한 경우 추가로 인용 문헌을 검색했다. 본 문헌 고찰에서 제외된 기준은 공기 중 지역시료, 표면 시료(wipe sample), 공정 부산물 그리고 원료에서 분석한 유해물질 결과들, 그리고 Gallium(Ga), Indium(In), Arsenic(As) 웨이퍼 제조와 패키징 가공 공정 결과 등이었다. 단시간 발생 또는 피크 노출은 표로 정리하지 않고 고찰에서 설명하였다. 고찰은 2015년 말까지 보고된 문헌만을 대상으로 했다.

III. 결 과

1. 화학물질

Table 1은 국내외 웨이퍼 가공 공정 공기 중에서 측정한 화학물질 종류와 노출기준 초과비율을 정리

Table 1. The list of airborne chemicals reported in fabrication operation

Author	Process	Sampling	Name of chemicals(No of sample)	Presence of chemicals over 50% of TLV
Jones(1988)	Photolithography	Area	Acetone(31), N-butyl(31), 2-ethoxyethyl(31), Hexamethyl disilazane(31), 2-methoxyethanol(31), Methyl ethyl ketone(4), Xylene(31)	No
	CVD		Hydrogen chloride(31)	No
	Etching & cleaning		Hydrogen fluoride(14), Nitric acid(2), Sulfuric acid(2)	No
	Diffusion		Antimony(2), Arsenic(2), Diborane(2), Phosphorus(7)	No
Hallock et al. (1993)	Photolithography	Personal	Acetone(6), propylene glycol monomethyl ether acetate(6), 2-ethoxyethyl acetate(6), xylene(6), n-butyl acetate(6)	No
Woskies et al. (2000)	Photolithography & developing	Personal	Fluoride(62), 2-ethoxy-ethyl acetate(48), n-butyl acetate(48), 1-methoxy-2-propyl acetate(48), 2-Methoxy ethanol(48), xylene(57), acetone(48), IPA(57)	No
Park et al(2010)	NI	Area	Benzene(24)*, arsine(12)*, fluoride(18), n-butyl acetate(24)*, 2-ethoxy-ethyl acetate (12)*, 2-Methoxy ethanol(12)*, propylene glycol monomethyl ether acetate(12), hydrofluoric acid(30), hydrochloric acid(30), sulfuric acid(30)*, nitric acid(30), phosphoric acid(30)*, IPA(24), phosphine(24), 2-heptanone(24)*, ethylene glycol(18)*	No
Park et al(2011)	Photolithography	Area	Benzene(40), IPA(40), hexane(40), propylene glycol monomethyl ether acetate(40), n-butyl acetate(40), toluene(40), xylene(40), ethyl benzene(40)	No

*Non-detected, NI=no information

한 것이다. 대부분의 물질이 시기, 공정, 직무별로 유의미한 경향을 나타낼 정도의 자료가 없는 것으로 확인했다. 물질 중 노출수준이 노출기준의 10%를 초과한 경우는 없었다. 미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)은 미국 환경부와 공동으로 1980년부터 1984년까지 웨이퍼 가공 공정에서 주요 화학물질과 전자 기장 발생수준을 조사했다(Jones, 1988). 포토 공정 유기용제, 식각 공정 산과 알칼리 그리고 확산과 이온 주입 공정에서 직무 구분없이 비소 등을 측정하였는데, 모두 노출기준보다 훨씬 낮은 수준이었다. Woskie et al.(2000)은 미국 35개 반도체 공장을 대상

으로 포토와 현상 공정에서 공기 중 여러 화학물질 노출수준이 노출기준 2% 이내인 것으로 보고했다(Woskie et al., 2000)(Table 1). Marano et al.(2010)은 역학 조사 대상 사업장의 과거 측정결과를 분석하였다. 1968년 2002년까지 미국 34개 반도체 공장에서 약 6만 개 공기 중, 벌크 그리고 표면시료(wipe sample) 중 60여개의 화학물질을 분석한 결과, 98%가 노출기준 미만이었고 50% 정도는 검출한계 미만이었다고 보고하였으며(표에 제시하지 않음), 일부 정비 작업에서만 노출기준을 초과하였다(Marano et al., 2010).

공학적으로 관리되는 웨이퍼 가공 공정의 클린룸에

Table 2. Airborne concentrations of Ethylene glycol ether and acetates in fabrication(ppb) in fab, ppb

Type glycol ethers	Year	Process	Job	N	Type of sample	AM	SD	GM	GSD	Maximum	Authors
2-ethoxyethyl acetate(2-EEA)	1980-84	NI		31	Personal	NI	NI	5	NI	520	Jones et al(1988)
	1981-84	NI		98	Personal	50	80	20	4.8	4,820	Scarpance et al. (1989)
	1989-90	Photolithography	Operator and inspector	6	Personal	3	NI	3		7	Hallock et al (1993)
	1990-91	NI		23	Personal	64	148	22	3.7	740	Hammond et al. (1996)
1-methoxy-2-propyl acetate(MPA)	1989-90	NI		21	Personal	14	15	16		60	Hallock et al (1993)
	1990-91	NI		20	Personal	12	14	8	2.5	53	Hammond et al. (1996)
	1989-90	Photolithography	Operator	4	Personal*	43	18	NI	NI	NI	Hallock et al (1993)
	1989-90	Photolithography	Operator	2	Personal ⁺	<2	0	NI	NI	NI	Hallock et al (1993)
2-ethoxyethyl acetate(2-EEA)	1981-84	NI		128	Area	50	160	10	6.1	6,080	Scarpance et al. (1989)
	1989-90			9	Area	15	28	2	NI	85	Hallock et al (1993)
	1991			2606	Area	14	16	9	NI	235	Corn and Cohen (1993)
	1992			13	Area	14	5	13	1.4	23	Beil et al(1994)
1-methoxy-2-propyl acetate(MPA)	1989-90			21	Area	19	50	5	NI	208	Hallock et al (1993)
	1992			13	Area	1.9	0.4	1.9	1.3	2.9	Beil et al(1994)
2-ethoxyethyl acetate(2-EEA)	2007	NI	NI	12	Area	<0.02					Park et al(2011)
2-methoxy ethanol	2007	NI	NI	12	Area	<0.02					Park et al(2011)

* Unload wafer cassettes

⁺ Load wafer cassettes

NI = no information

서 개별 화학물질의 노출은 보통 노출기준보다 훨씬 낮다. 우리나라에서 보고된 연구결과도 비슷하다. 2007년 우리나라 9개 웨이퍼 가공 공장에서 노출기준을 초과한 화학물질은 없었다. 공기 중 벤젠, 아르신, 황산, 인산, n-butyl acetate, 2-ethoxy-ethyl acetate, 2-Methoxy ethanol, 2-heptanone, ethylene glycol은 검출되지 않았다(Park et al., 2011b). 화학물질이 채취된 공정, 지역 시기 그리고 채취 상황 등에 대한 정보는 없었다(Table 1).

웨이퍼 가공 공정에서 상대적으로 측정이 많이 이루어졌던 물질은 포토 공정의 Ethylene glycol ether와 아세테이트류(이하 EGE), 그리고 이온 주입 공정의 비소이다. 포토 공정에서 공기 중 EGE류 발생수준은 모두 2000년대 이전에 보고된 것이다(Table 2). EGE 계통의 2-ethoxyethanol(EEA), 2-methoxyethanol(MEA) 등이 낮은 농도(< 1 ppm)지만 모두 검출되었다(Hammond et al., 1996). EEA 기하평균농도는 22 ppb(GSD 3.7)였고 최고 농도는 각각 120 ppb, 740 ppb였다. 이들 EGE류는 포토 공정에서 감광재로 쓰이는 양성 PR (photolithography register, 이하 PR)에 들어있는 성분이다. 당시에 사용한 PR에는 평균 60% (범위: 55-82%)가 EEA를 함유한 것으로 보고되었다. 양성 PR에서 Methoxy propanol acetate(MPA) 함량은 조금 더 높은 72%(범위: 60-73%)였다. Zellers et al.(1992)도 양성 PR

에서 2 ethoxy ethyl acetate(2-EEA)가 82% 그리고 2-EEA가 68%로, 음성 PR에서는 2-methoxy ethanol(2-ME)은 6% 이하인 것으로 보고했다(Zellers et al., 1992). 1990년대 중반까지 공기 중 EGE류가 검출된 것으로 보아 PR에서 EGE류가 핵심물질로 사용된 것으로 추정할 수 있다. 이들은 낮은 증기압(모두 20℃, 6 mmHg 이하) 때문에 공기 중 발생 가능성은 높지 않아 호흡기 노출보다는 보통 피부를 통해서 흡수되는데, 피부 보호 장갑(PVC, 자연 고무, nitrile 장갑 등)도 투과하여 흡수되는 것으로 알려져 있으므로(Zellers et al., 1992), EGE류 노출은 공기와 피부노출 가능성을 종합해서 평가해야 한다(Clapp et al., 1984). 미국에서는 1990년대 중반 무렵 PR에 포함된 EGE류와 이들 아세테이트류(2-Methoxyethyl acetate, 2-Methoxyethanol, 2-ethoxyethanol, 2-ethoxy ethyl acetate)의 생식독성이 밝혀짐에 따라 Propylene glycol monomethylethers (PGMEA)로 대체된 것으로 보고되었다(Correa et al., 1996). 1995년 이후 지금까지 반도체 공정에서 EGE류 발생이나 노출수준을 보고한 문헌이 없어 EGE류가 언제부터 사용되지 않았는지 구체적인 시기는 알 수 없으나, 2000년대 이전에는 포토 공정에서 EGE 노출 가능성은 높은 것으로 추정할 수 있다.

웨이퍼 가공 공정에서 비소 발생 및 노출수준은 다른 유해인자에 비해 상대적으로 많이 보고되었다.

Table 3. Summary of airborne arsenic levels measured in ion implantation operation(excerpt from Park et al., 2010)

Author	Year studied	Location sampled	Sampling type ^a	No. of samples	No. of samples detected	Average level, ug/m ³	Deviation	Range (ug/m ³)
Wade et al(1981) ^b	NI	Furnace maintenance	NI	NI	NI	85	NI	NI
McCarthy (1985)	NI	Maintenance (grinding)	P	NI	NI	3200(258 #)	NI	NI
		Maintenance (grinding)	P	NI	NI	340(129 #)	NI	NI
		Maintenance (grinding)	A	NI	NI	400(147 #)	NI	NI
		Maintenance (grinding)	A	NI	NI	6.7(2.6 #)	NI	NI
Ungers and Jones (1986)	NI	Machine control panel	A	11	NI	GM=0.5	GSD = 3.7	<0.1-3.6
		End station	A	15	NI	GM=0.3	GSD = 2.6	<0.1-1.2
		Manipulator (during beam path maintenance)	A	1	1	13643		NA
		Ion source (during beam path maintenance)	A	7	NI	GM=2.6	GSD = 14.1	<0.1-83.0
		Ion source (under cleaning hood)	A	2	NA	<0.1		NA
		Operator	P	5	NI	GM=0.3	GSD = 4.7	<0.1-1.7
		Maintenance personnel	P	3	NI	GM=0.2	GSD = 2.0	<0.1-0.4

Baldwin et al (1988)	1979-1987	Implanter preventive maintenance with wet cleaning technique	P	45	30	GM=0.32 (0.10 #)	GSD = 7.5 (6.9 #)	NI
		Wet cleaning of source housing	P	5	NI	GM=1.4 (0.12 #)	GSD = 3.2 (5.4 #)	NI
		Dry cleaning of source housing	P	10	NI	GM=53 (13 #)	GSD = 6.3 (6.1 #)	NI
		Cleaning dry bead blaster dedicated to ion implanter parts	P	NI	NI	AM=224 (8.4 #)		NI
		Cleaning dry bead blaster dedicated to ion implanter parts	P	NI	NI	AM=47 (1.7#)		NI
		Cleaning portable vacuum used for implanters	P	NI	NI	AM=1 5(1.6 #)		NI
		Cleaning exhaust hood used for implanter maintenance	P	NI	NI	AM=3.9 (0.2 #)		NI
		Cleaning wet bead blaster dedicated to ion implanter parts	P	NI	NI	0.1(0.006 #)		NI
Peyster and Silvers (1995)	NI	Ion source cleaning	P	8	1	12		NA
		Ion source cleaning (outside hood)	A	14	1	0.32		NA
		Ion source cleaning (inside hood)	A	4	3	AM=125	SD=195 ug/m ³	5-350
		Source housing cleaning	P	4	2	AM=9	SD=9 ug/m ³	2-15
		Source housing cleaning (fan housing)	A	2	1	1		NA
		Epitaxial reactor cleaning	P	3	1	1.8		
Hwang and Chen (2000)	NI	Housing source	A	26	16	GM=0.67	GSD = 6.5	0.12-440
		Housing source (inside hood)	A	19	14	GM=4.62	GSD = 14.3	0.24-560
		Housing source (outside hood)	A	7	5	GM=0.72	GSD = 3.5	0.20-4.45
		Beam line	A	9	4	GM=0.46	GSD = 2.2	0.19-0.9
		End station	A	9	4	GM=0.13	GSD = 4.6	0.05-1.30
		Work table	A	4	1	0.32		0.32
		Passageway	A	8	3	GM=0.2	GSD = 3.0	0.09-0.72
		Total		93	47	GM=0.92	GSD = 9.2	0.05-560
Hwang et al., (2002)	NI	Maintenance personnel	P	31	11	GM=1.66	GSD = 2.2	0.50-7.00
		at ion implanter	A	6	6	NI	NI	0.007-0.055
		End station	A	1	1	0.016		
		Ion source chamber	A	1	1	15.6		
		Passageway	A	3	2	NI	NI	<0.005-0.031
		Wiping site on passageway	A	1	1	0.019		
		Inside hood in cleaning room	A	4	2	NI	NI	<0.005-0.037
		Outside hood in cleaning room	A	1	0	NA	NA	NA
Chen (2007)	NI	Total	A	17	13			<0.005-15.6
		Operators	P	72	NI	AM=25.66	SD=NI	5.3-106.1
		Engineers	P	72	NI	AM=22.42	SD=NI	4.7-102.4
		Administrative	P	72	NI	AM=3.56	SD=NI	0.4-18.8

Notes:

¥; P=personal sampling, A=area sampling, B= personal and area

; 8 hour TWA(time-weighted average)

\$; measurement cited from the table reported by Williams et al (1995)

NI=no information, NA=nothing applicable, GM=geometric mean, GSD = geometric standard deviation, AM=arithmetic mean, SD=standard deviation

저자는 2010년까지 반도체 웨이퍼 가공 공정에서 보고된 공기와 벌크 중의 농도를 시기별, 공정별로 정리하고 고찰하였다. 이 문헌에서 시기별, 공정별로 비소 노출수준만을 추출해서 인용했다(Table 3). 총 423개 측정치와 40개 요약 통계치를 종합하면 이온 주입 공정의 운전자가 노출된 비소수준은 $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=77$), 정비작업자는 $7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=181$)였다. 가장 높은 노출농도($218.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 임플란트를 정비하는 작업자로부터 채취되었다(Park et al., 2010). 이온 주입 공정에서 비소 노출 위험은 항상 있다. 특히,

정비과정에서 비소 노출은 더 높을 수 있다.

2. 극저주파(Extremely low frequency-magnetic field)

극 저주파 노출수준을 시기별, 공정별, 직무별로 정리하였다(Table 4). 지금까지 총 3건의 연구가 진행되었으며, 1990년대 확산 공정의 furnace($1.24 \mu\text{T}$), 박막과 이온 주입 공정($4.9 \mu\text{T}$), 식각($1.7 \mu\text{T}$) 공정에서 상대적으로 높은 노출수준을 나타냈다(Abdollahzadeh et al., 1995). 2010년대 우리나라 반도체 공정을 대상으로한 근로자의 직무별 평가에서는 모두 $1 \mu\text{T}$ 이하

Table 4. Summary of exposure to extremely low frequency in fabrication operation, μT

Authors	Year	No of plants	Process	Job	N	AM	SD	GM	GSD	Maximum
Crawford et al (1993)		6	Cleanroom(NI about process)	NI	45	0.34	0.3	NI	NI	NI
Abdollahzadeh et al (1995)	1991	Plant 1	Photolithographylithography	NI	5	0.94	0.34	NI	NI	NI
			Etching		4	0.73	0.31	NI	NI	NI
			Furnace		5	1.24	0.38	NI	NI	NI
			Thinfilim & ion implantation		3	4.9	0.02	NI	NI	NI
	1992	Plant 1	Photolithographylithography		16	0.8	0.33	NI	NI	NI
			Etching		7	0.68	0.16	NI	NI	NI
			Furnace		12	0.95	0.31	NI	NI	NI
			Thinfilim & ion implantation		10	0.4	0.15	NI	NI	NI
	1992	Plant2	Photolithographylithography		8	0.18	0.05	NI	NI	NI
			Etching		8	0.17	0.06	NI	NI	NI
			Furnace		5	0.52	0.12	NI	NI	NI
			Thinfilim & ion implantation		8	0.23	0.05	NI	NI	NI
	1991	Plant 3	Photolithographylithography		7	0.47	0.16	NI	NI	NI
			Etching		6	0.3	0.23	NI	NI	NI
			Furnace		8	0.62	0.2	NI	NI	NI
			Thinfilim & ion implantation		9	0.43	0.31	NI	NI	NI
	1992	Plant3	Photolithographylithography		26	0.47	0.24	NI	NI	NI
			Etching		7	1.7	0.12	NI	NI	NI
			Furnace		20	0.74	0.25	NI	NI	NI
			Thinfilim & ion implantation		15	0.51	0.48	NI	NI	NI
Chung et al(2012)	NI	4	NI	Process engineer	25	0.82	0.82	0.66	2.11	123.2
				Maintenance engineer	21	0.74	1.84	0.38	2.78	109.4
				Operator	35	0.67	1.22	0.35	3.24	15.3

였으나(Chung et al., 2012), 공정과 직무를 구분한 극저주파 노출수준은 보고되지 않았다.

웨이퍼 가공 기기 주변에서 극저주파 발생수준은 확산의 furnace, 박막공정의 스퍼터(sputter) 등 근처가 다른 곳에 비해 높게 발생하는 것으로 보고되었다(Rosenthal & Abdollahzadeh, 1991). 웨이퍼 가공 공정에서 높은 극저주파 노출 근원은 높은 전류 에너지가 사용되는 확산, 임플란트, 스퍼터 등인 것으로 판단된다.

3. 엑스레이

엑스레이 노출 위험이 있는 것은 이온 주입 공정이다(Baldwin et al., 1988). 고전압 에너지 임플란트 장치 근처에서 엑스레이가 발생하는 것으로 알려져 있다. 이 공정 근로자의 엑스레이 노출수준은 아직 보고된 적이 없다. 지금은 근원적으로 임플란트 챔버가 사방으로 납이 차폐되어 있어 정상적인 운전이나 정비작업에서 노출수준은 유의미하지 않을 것으로 판단되지만 과거의 노출수준은 단정하기 어렵다.

IV. 고 찰

우리나라는 2000년대 들어 반도체 공장에서 일했던 근로자에게서 백혈병 등 여러 암과 희귀질환 등이 발생하였고 이러한 질병이 반도체 환경 때문에 생긴 것인지에 관한 조사, 연구가 진행되었지만 논란이 해소되지 않았다. 영국과 미국에서 반도체 산업은 1960년대부터 그리고 우리나라에서는 1970년대 무렵부터 시작되었다. 대략 1980-1990년대 반도체 산업 웨이퍼 가공 공정 근로자에게서 생식독성 등이 유의하게 보고되었다. 암 발생 및 암 사망 위험은 1980년대부터 처음 문제가 제기되기 시작하여, 1990년대 이후부터 최근까지 이에 대한 결과들이 연이어 발표되었다(Sorahan et al., 1985; Sorahan et al., 1992; McElvenny et al., 2003; Hsieh et al., 2005; Bender et al., 2007; Boice et al., 2010; Lee et al., 2011). 역학연구는 물론이고 질병의 직무연관을 밝히기 위해서는 집단이든 개인이든 유해인자 노출과 관련된 기록(측정결과, 노출평가 결과 등)이 많아야 한다. 이를 근거로 노출을 추정하고 연관 지을 수 있기 때문이다.

반도체 산업의 역사와 건강 영향 논란에 비해 본

연구에서 정리한 바와 같이 웨이퍼 가공 공정 근로자의 화학물질이나 방사선 노출을 평가한 논문은 많지 않다. 이것도 특정한 위험인자, 공정, 시기, 직무 등에만 해당되는 연구결과가 대부분이기 때문에 웨이퍼 가공 공정에서 일했던 근로자의 전반적인 노출 결과로 추정하기에는 한계가 있다.

고찰 논문은 특정 산업에서 발생한 유해인자에 대해서 시기별, 공정별, 직무별 경향을 정리하는 데 의미가 있다. 본 연구에서는 문헌 부족으로 웨이퍼 가공 공정에서 화학물질을 포함한 유해인자의 과거 및 현재 노출을 추정할 만한 결과를 낼 수 없었다. 특히 공정 정비자가 노출될 수 있는 화학물질, 극저주파, 엑스레이 등에 대한 문헌은 거의 없다. 현재 논란이 되는 백혈병 등 각종 암과 희귀성 질환의 연관을 밝히기 어려운 부분이다.

반도체 공정 중 웨이퍼 가공 공정은 화학물질과 에너지를 많이 사용하기 때문에 건강위험 및 유해인자 노출위험은 항상 존재한다. 본 연구결과를 토대로 현재 및 과거 노출평가에서 주의해야 할 점을 정리하였다.

첫째, 문헌에서 주요 화학물질 대부분의 노출수준은 노출기준을 초과한 경우가 없었지만 이 결과의 해석에 주의할 필요가 있다. 최근 웨이퍼 크기 300 mm를 가공하는 공정은 자동화되면서 운전자나 감독자의 화학물질 등 유해인자 노출수준은 더 낮아진 것은 분명하다. 그러나 300 mm 이하 웨이퍼 가공 공정에서는 근로자가 화학물질 및 제품을 수동 또는 반 자동으로 취급하기 때문에 화학물질 등 유해인자 노출위험은 크다. 웨이퍼 크기별로 화학물질을 포함한 유해인자의 노출수준을 비교한 문헌은 아직 없다. 과거 웨이퍼와 화학물질을 직접 손으로 취급해야 했던 수동작업 또는 반 자동 작업에서 유해인자에 대한 노출수준은 높았을 가능성이 있다.

둘째, 웨이퍼 가공 공정에서 정비작업자의 화학물질, 극저주파 등 유해인자에 대한 노출수준을 보고한 문헌은 많지 않다. 공정별 정비는 물론 정화장치, 펌프, 덕트, 자동화 기계 등 각종 유틸리티, 공정 지원 시설에 대한 주기적 혹은 비정상적인 정비과정에서 노출되는 유해인자 특성 및 노출수준은 보고된 것이 거의 없다. 이것은 웨이퍼 가공 공정 출입이 쉽지 않

고 기술적으로 정비가 이루어지는 시기, 장소를 맞추어 노출수준을 평가하는 것이 어렵기 때문이다. 국내 외에서 정비와 같은 위험 직무는 외주화하는 경향이 늘어나 노출 및 건강영향 감시가 어려운 것도 이유가 될 수 있다. Park et al.(2010) 이온 주입 공정에서 정비 작업장의 비소노출은 높은 것으로 보고하였으며(Park et al., 2010), 정비작업자는 자동화와 상관없이 공정설비, 기계 등을 정비, 수리, 교체하기 때문에 화학물질, 방사선 등에 대한 노출위험은 현재에도 크게 변한 것이 없다. 과거는 물론이고 현재에도 정비 직무 그리고 비정상적인 직무에서 정비자의 유해인자 노출은 상대적으로 높을 수밖에 없다.

셋째, 단시간(short term) 동안 화학물질, 극저주파, 엑스레이 등 유해인자에 대한 노출수준을 평가한 연구는 거의 없었다. 웨이퍼 가공 공정에서 단시간 혹은 피크 노출을 평가한 경우는 포토 공정 정비나 운전자의 유기용제 피크 노출을 평가한 경우가 유일하다. Hallock et al.(1993)은 포토 공정에서 운전자의 여러 작업(task) 중 시간가중 및 단 시간 동안 노출되는 유기용제(acetone, propylene glycol monomethyl etheracetate, 2-ethoxyethyl acetate, xylene, n-butyl acetate 등) 수준을 보고하였으나 모두 노출기준 미만이었다. 단 시간 노출되는 농도 중 아세톤을 병에 부을 때 순간 발생된 공기 중 농도는 273 ppm이었다. TIP(Total ionizables present)로 실시간으로 측정한 피크 유기용제 농도는 동물실험에서 생식독성을 초래한 수준 이하였다. 아세톤으로 코팅된 부품을 세척할 때 최대 1,162 ppm이었다(Hallock et al., 1993).

하루 평균 시간 가중 평균 노출수준은 위험한 경우는 흔치 않다. 정비직무, 공정 오류 등 단 시간 및 피크 노출에 대한 노출평가가 필요하다. 극저주파 피크 노출은 정비 작업자뿐만 아니라 운전자, 감독자 등에게도 일어난다. 에너지를 사용하는 장비 근처에서 순간 머물거나 일을 할 때 노출될 수 있기 때문이다. 극저주파가 발생하는 반도체 장비는 furnace, sputter, ion implanter, heater 등이다(Crawford et al., 1993).

넷째, 반도체 웨이퍼 가공 공정의 극저주파 노출은 다른 산업에 비해 전반적으로 높았다. 웨이퍼 가공 공정 운전자의 극 저주파 노출수준(Table 4)은 전기를 취급하는 주요 직무자 평균 노출수준(전기엔지니어;

0.28 μ T, 전기기술자; 0.66 μ T, 전기 활선; 3.61 μ T, 전기공; 0.37 μ T, 전화선; 0.20 μ T, 0.49 μ T, TV수리; 0.39 μ T, 0.27 μ T, 전기 발전소; 1.43 μ T, 0.62 μ T, 전기 설비자; 0.30 μ T, 1.56 μ T)과 비슷하거나 높았다(Bowman et al., 2007). 극저주파 노출기준(미국산업위생전문가 협의회, 국제비전리방사선방호위원회)들은 사람을 대상으로 수행된 역학연구 결과에 의해서 유도된 것이 아니고 전기적 강도에 따라 일어난 생물학적 변화의 개략적인 경계수준을 잡은 것이기 때문에 단순히 비교하여 평가하는 것에 주의해야 한다(ICNRP, 2010). 극저주파는 소아 백혈병에 대한 분명한 위험요인으로 규명되었지만 성인 백혈병과 뇌암 등 위험과의 연관은 여전히 논란이 많다. 아무런 연관이 없다는 결론에서부터 매우 강한 연관이 존재한다는 결과까지 다양하다. 따라서 사전예방의 원칙에 따라 극 저주파 노출 저감을 위한 예방적 조치가 필요하다.

마지막으로 주요 발암인자에 대한 노출수준 결과가 부족해 과거 노출을 추정하는 데 한계가 있다. 웨이퍼 가공 공정 근로자는 수많은 화학물질은 물론 방사선(전리 및 비전리 방사선), 인간공학적 이슈, 심리적인 스트레스 등에 지속적으로 노출되고 있다(LaDou, 2000; Watterson & Ladou, 2003; Smith et al., 2006). 웨이퍼 가공 공정 근로자들은 과거 발암물질(인자)인 벤젠, 비소 및 비소화합물, 크롬화합물, 자외선, 이온화방사선(엑스레이 등), 황산, 트리클로로에틸렌, 트리클로로에탄, 사염화탄소, 아르신, 안티몬 화합물 등에 노출되었던 것으로 알려져 있다(McElvenny et al., 2003; Herrick et al., 2005). 이들에 대한 현재의 노출 정도는 공학적인 기술 향상, 자동화된 기계 설비 증가, 공정 및 장비 밀폐, 반도체 위험 인식 증가 등으로 감소되고 있지만 과거 노출로 인한 건강 영향 가능성은 여전히 남아 있다. 독성이 크고 노출빈도가 많은 주요 발암, 생식, 돌연변이 화학물질과 유해인자에 대한 노출 및 건강영향은 근로자가 소속된 공정과 직무로 묶은 직무노출매트릭스로 감시하는 것이 효과적이다.

V. 결 론

본 연구는 반도체 웨이퍼 가공 공정에서 발생하는

주요 화학물질과 극저주파 노출수준을 문헌을 통해 종합했다. 포토 공정의 유기용제류와 EGE류, 이온 주입 공정의 비소 그리고 웨이퍼 가공 공정 전반의 극저주파 등이 운전자를 중심으로 평가된 결과가 대부분이었고 노출수준도 매우 낮았다. 이 결과들은 시기별로 공정과 직무 노출을 추정할 수 있는 대표성을 갖기에는 한계가 있다. 특히, 정비자의 화학물질, 극저주파, 엑스레이 등의 노출수준을 보고한 문헌은 매우 부족하다. 웨이퍼 가공 공정 근로자의 화학물질 및 방사선에 대한 과거 노출을 추정하는 데 주의를 기울여야 한다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 한국방송통신대학교 지원을 받아 작성된 것으로 이에 감사를 드립니다.

References

- Abdollahzadeh S, Katharine SH, Schenker MB. A model for assessing occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields in fabrication rooms in the semiconductor health study. *Am J Ind Med* 1995;28:723-734
- Baldwin D, King B, Scarpace L. Ion Implanters-Chemical and radiation safety. *Solid State Technol* 1988;31:99-105
- Bender TJ, Beall C, Cheng H, Herrick RF, Kahn AR, et al. Cancer incidence among semiconductor and electronic storage device workers. *Occup Environ Med* 2007;64:30-36
- Boice JD, Marano DE, Munro HM, Chadda BK, Signorello LB, et al. Cancer Mortality Among US Workers Employed in Semiconductor Wafer Fabrication. *J Occup Environ Med* 2010;52:1082-1097
- Bowman JD, Touchstone JA, Yost MG. A population-based job exposure matrix for power-frequency magnetic fields. *J Occup Environ Hyg.* 2007;4:715-728
- Chung EK, Kim KB, Chung KJ, Lee IS, You KH, Park JS. Occupational exposure of semiconductor workers to ELF magnetic fields. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2012;22:42-51
- Clapp DE, Zaubst DD, Herrick RF. Measuring exposures to glycol ethers. *Environ Health Perspect* 1984;57:91
- Correa A, Gray RH, Cohen R, Rothman N, Shah F, et al. Ethylene glycol ethers and risks of spontaneous abortion and subfertility. *Am J Epidemiol* 1996;143:707-717
- Crawford W, Green D, Knolle W, Marcos H, Mosovsky J, et al. Magnetic field exposure in semiconductor cleanrooms. *Hazard Assessment and Control Technology in Semiconductor Manufacturing II*. 1993
- Hallock MF, Hammond SK, Kenyon E, Smith TJ, Smith ER. Assessment of task and peak exposures to solvents in the microelectronics fabrication industry. *Appl Occup Environ Hyg* 1993;8:945-954
- Hammond S, Hines C, Hallock M, Woskie S, Kenyon E, Schenker M. Exposures to glycol ethers in the semiconductor industry. *Occup Hyg* 1996;2
- Harrison M. Semiconductor manufacturing hazards. Williams & Wilkins, *Hazardous Materials Toxicology: Clinical Principles of Environmental Health(USA)* 1992;472-504
- Herrick RF, Stewart JH, Blicharz D, Beall C, Bender T, et al. Exposure assessment for retrospective follow-up studies of semiconductor-and storage device-manufacturing workers. *J Occup Environ Med* 2005;47:983-995
- Hsieh GY, Wang JD, Cheng TJ, Chen PC. Prolonged menstrual cycles in female workers exposed to ethylene glycol ethers in the semiconductor manufacturing industry. *Occup Environ Med* 2005;62:510-516
- ICNRP(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys.* 2010;99:818-836
- Jones JH. Exposure and control assessment of semiconductor manufacturing. *Photolithographyvoltaic Safety* 1988: AIP Publishing
- LaDou J. Occupational health in the semiconductor industry. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society* 2000, Washington DC, USA
- Lee HE, Kim EA, Park J, Kang SK. Cancer mortality and incidence in Korean semiconductor workers. *Saf Health Work* 2011;2:135-147
- Marano DE, Boice Jr JD, Munro HM, Chadda BK, Williams ME, et al. Exposure assessment among US workers employed in semiconductor wafer fabrication. *J Occup Environ Med* 2010;52:1075-1081
- McElvenny DM, Darnton AJ, Hodgson JT, Clarke SD, Elliott RC, Osman J. Investigation of cancer incidence and mortality at a Scottish semiconductor manufacturing facility. *Occup Med* 2003;53:419-430
- Park DU, Yang HS, Jeong JY, Ha KC, Choi SJ, et al. A

- comprehensive review of arsenic levels in the semiconductor manufacturing industry. *Ann Occup Hyg* 2010;54:869-879
- 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* 2011a;23:333-342
- Park HH, Jang JK, Shin JA. Quantitative exposure assessment of various chemical substances in a wafer fabrication industry facility. *Saf Health Work* 2011b; 2:39-51
- Rosenthal FS, Abdollahzadeh S. Assessment of extremely low frequency (ELF) electric and magnetic fields in microelectronics fabrication rooms. *Appl Occup Environ Hyg* 1991;6:777-784
- Smith T, Sonnenfeld DA, Pellow DN. Challenging the chip: Labor rights and environmental justice in the global electronics industry: Temple University Press; 2006
- Sorahan T, Pope DJ, Mckiernan MJ. Cancer Incidence and Cancer Mortality in a Cohort of Semiconductor Workers - an Update. *Br J Ind Med* 1992;49:215-216
- Sorahan T, Waterhouse JAH, Mckiernan MJ, Aston RHR. Cancer Incidence and Cancer Mortality in a Cohort of Semiconductor Workers. *Br J Ind Med* 1985;42: 546-550
- Wald PH, Jones JR. Semiconductor Manufacturing - an Introduction to Processes and Hazards. *Am J Ind Med* 1987;11:203-221
- Watterson A, Ladou J. Health and safety executive inspection of UK semiconductor manufacturers. *Int J Occup Environ Health* 2003;9:392-396
- Woskie SR, Hammond SK, Hines CJ, Hallock MF, Kenyon E, et al. Personal fluoride and solvent exposures, and their determinants, in semiconductor manufacturing. *Appl Occup Environ Hyg* 2000;15:354-361
- Zellers ET, Ke H, Smigiel D, Sulewski R, Patrash SJ, et al. Glove permeation by semiconductor processing mixtures containing glycol-ether derivatives. *Am Ind Hyg Assoc J* 1992;53:105-116