

반도체 웨이퍼 가공 근로자의 생식독성과 암 위험 역학연구에서 과거 노출평가 방법 고찰

Critical review of retrospective exposure assessment methods used to associate the reproductive and cancer risks of wafer fabrication workers

박동욱* · 이경무

Donguk Park* · Kyungmoo Lee

한국방송통신대학교 환경보건학과

Department of Environmental Health, Korea National Open University

ABSTRACT

Objectives: The aim of this study is to critically review the exposure surrogates and estimates used to associate health effects in wafer fabrication workers such as spontaneous abortion and cancer, as well as to identify the limitations of retrospective exposure assessment methods

Methods: Epidemiologic and exposure-assessment studies of wafer fabrication operations in the semiconductor industry were collected. Retrospective exposure-assessment methods used in cancer risk and mortality and reproductive toxicity were reviewed.

Results: Eight epidemiologic papers and two reports compared cancer risk among workers in wafer fabrication facilities in the semiconductor industry with the risk of the general population. Exposure surrogates used in those cancer studies were fabrication(vs. non-fabrication), employment duration, manufacturing eras, job title (operator vs. maintenance worker) and qualitative classifications of agents without assessing specific agent or job-specific exposure. In contrast, specific operation, job title and agents were used to classify the exposure of fabrication workers, contributing to finding a significant association with spontaneous abortion (SAB).

Conclusion: Further epidemiologic studies of fabrication workers using more refined exposure assessment methods are warranted in order to examine the associations between fabrication work, environment, and specific agents with cancer risk or mortality as used in SAB epidemiologic studies.

Key words : semiconductor industry, wafer fabrication, retrospective assessment

I. 서 론

국내외 반도체 근로자들에게 발생한 암 위험이 직무와 관련이 있는지 논란이 계속되고 있다. 국내에서는 지금까지 반도체 공정에 근무하였던 근로자 16명이 자신들이 수행했던 직무가 건강장해와 연관이 있다고 주장하여 산업재해 신청을 하였다(2011년 1월 말 기준). 지금까지 업무상 재해에 대한 심의를 거친 14명 가운데 한 명도 산업재해로 인정을 받지 못했다. 이들 중 5명이 행정소송을 제기했고, 2011년 6

월 23일 법원은 그 중 2명에게서 나타난 백혈병이 과거 반도체 직무와 관련이 있다고 판결했다(박동욱 등, 2011). 법원의 판결과는 별개로, 반도체 근로자의 암 위험 과 직무와의 연관성을 밝히기 위해 진행된 그 동안의 국내외 역학조사에서 활용된 과거 유해인자 노출정보들이 충분하고 신뢰성이 있었는지 평가해야 할 것이다.

본 연구에서는 반도체 웨이퍼 가공 공정 근로자의 생식독성, 암 위험 그리고 사망을 연구한 국내외 모든 역학논문에서 사용한 노출평가 방법을 고찰하였

*Corresponding author: Donguk Park

서울 종로구 동숭동 169, 한국방송통신대학교 환경보건학과, Tel: 02-3668-4707,

Fax: 02-741-4701, E-mail: pdw545@gmail.com, Received: 2012. 2. 22., Revised: 2012. 3. 26., Accepted: 2012. 3. 27.

다. 또 그 동안의 역학조사에서 사용한 과거의 노출 정보 종류, 수준, 질(quality) 그리고 평가방법을 분석하여 주요 한계점도 정리하였다. 본 연구 목적을 이해하기 위해서 반도체 산업 중 웨이퍼 가공 공정의 개략적인 원리와 노출될 수 있는 주요 유해요인을 정리하였다.

II. 연구방법

본 연구는 모두 문헌고찰로 수행되었다. 고찰 대상은 반도체 산업 중에서 웨이퍼를 가공하는 공정을 대상으로 수행한 역학조사이다. 웨이퍼가공 공정 근로자를 대상으로 암 사망이나 발생위험을 밝히기 위한 역학조사에서 활용한 공정, 생산시기, 근로자 노출 기간과 직무, 유해인자 발생 등에 대한 과거노출을 고찰하였다. Pub Med와 구글 학술 검색 프로그램을 활용하여 “semiconductor industry”, “silicon wafer”, “silicon chip”, “electronic industry”, “wafer fabrication” 등 반도체 산업을 나타내는 “주요어(key word)”로 문헌을 검색한 후 생식독성, 암발생, 암 사망 등과 관련된 연구결과를 선별하여 고찰하였다. 본 연구에서 고찰한 주요 연구 내용은 반도체 웨이퍼 가공 공정과 공정에서 발생하는 유해인자, 반도체 웨이퍼 가공 공정 근로자의 직무, 반도체 웨이퍼 가공 공정 근로자 생식독성 역학연구 그리고 반도체 웨이퍼 가공 공정 근로자 암 발생 및 사망 역학 연구이다. 웨이퍼 가공 공정 흐름은 유해인자 노출과 관련된 주요 핵심 내용만을 정리하였다(Boice et al., 2010; Hawkinson and Korpela et al., 1998; Stewart and Elkington, 1985; Wald and Jones, 1987)

III. 결과 및 고찰

1. 반도체 웨이퍼 가공 공정의 원리와 주요 유해인자

국내외에서 주로 논란이 되고 있는 반도체 공정은 실리콘 웨이퍼 가공(fabrication)이다. 이 공정은 모래(SiO_2)에서 정제한 실리콘(Si) 기판(substrate) 위에 미리 설계한 회로(circuits)를 전사(transfer)하고 서로 전기가 흐르도록 가공하는 것이다. 웨이퍼 가공 공정은 보통 다음과 같은 4개의 핵심 과정으로 이루어진다(Boice et al., 2010; Hawkinson and Korpela et al., 1998; Stewart

and Elkington, 1985; Wald and Jones, 1987).

1) 회로패턴 공정으로 기판에 설계한 회로를 전사하고 불필요한 부분을 제거하여 회로패턴을 만드는 것이다. 실리콘 기판 위에 산화막을 입힌 다음 포토 공정에서 미리 설계된 회로를 전사하고, 현상(developing) → 식각(etching) → 박리(stripping) 과정에서 불필요한 부분을 제거하여 회로 패턴 공정을 완성한다. 산, 염기, 유기용제 등 화학물질을 가장 많이 사용하는 공정이다.

2) 회로장치들 간에 전기가 통하게 하는 회로 접합형성(junction formation) 공정이다. 이 공정에서는 회로에 전기가 통하도록 자유전자가 1개 남거나(5족) 부족하여(3족) 전자를 이동시킬 수 있는 불순물(impurities or dopants)을 기판에 주입한다. 확산과 이온 임플란타를 활용하여 불순물 가스가 기판으로 박히거나 스며들게 한다. 이 공정에서 발생하는 주요 유해요인은 불순물 원료인 실란, 포스핀, 보론, 비소화합물 등이 있다. 또한 불순물 가스를 가속화시키기 위해 사용하는 고전압 때문에 엑스레이도 발생된다.

3) 회로 층을 다시 실리콘으로 얇게 증착하는 박막(thin film) 공정이다. 여기서는 실리콘을 함유하는 화학물질에 플라즈마 등 높은 에너지를 가하여 실리콘을 증착한다. 일반적으로 사용하는 가스는 실란(SiH_4), 디클로로실란(dichlorosilane; $\text{DCS SiCl}_2\text{H}_2$), 테트라에틸오르쏘실리케이트(tetraethylorthosilicate; TEOS; $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) 등이다. 박막 원료 가스에 높은 에너지를 가하면 수많은 유해한 부산물 등이 생긴다고 알려져 있다.

4) 마지막으로 금속 증착 공정이다. 여러 층으로 쌓은 장치들 간에 전기가 통하도록 전도성 금속을 증착한다. 주로 사용되는 금속으로는 알루미늄, 안티몬, 금, 니켈 화합물 등이 있다. 일반적으로 금속화합물에 전자빔이나 고열을 가하여 금속이 증발하면서 증착(deposition)되도록 한다.

웨이퍼를 가공하는 모든 공정은 수많은 화학물질과 높은 에너지를 집중적으로 사용한다. 화학물질은 유기용제, 강산, 강염기, 독성 가스 등 모든 형태가 사용된다(Table 1). 뿐만 아니라 화학물질에 높은 에너지를 가하는 건식 공정에서는 반응 부산물(byproducts)도 매우 많이 발생된다. 웨이퍼 가공 근로자는 높은 전압과 전류 등에서 발생하는 전리 및 비전리

Table 1. Major chemicals used in wafer fabrication operations (Boice et al., 2010; Hawkinson and Korpela et al., 1998; Stewart and Elkington, 1985; Wald and Jones, 1987)

| Process | Name of chemicals used |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cleaning | Sulfuric acid(H_2SO_4), Nitric acid, Hydrofluoric acid, Hydrogen chloride, Hydrogen peroxide, Isopropylalcohol, ammonium hydroxide, 1,1,1-trichloroethane, Trichloroethylene, Freons |
| Photo-lithography | PR including hexamethyldisilazane, cellosolves < 2-ethoxyethanol, 2-ethoxy ethanol acetate>, propylene glycol ethers |
| Developing | n-butylacetate, xylene<negative>, sodium hydroxide, Tetramethylammonium hydroxide, potassium hydroxide <positive> |
| Wet etching | Hydrofluoric acid, Hydrogen chloride, Sulfuric acid(H_2SO_4), Phosphoric acid, Acetic acid, Nitric acid, Chromium(III) oxide(Cr_2O_3)- |
| Dry etching | Chlorine (Cl_2), (Borontrichloride (BCl_3), Hydrogenchloride (HCl), -Trifluoromethane (CHF_3), (Bromine, Br_2), Tetrafluoromethane, CF_4), 사염화탄소(carbon tetrachloride, CCl_4) |
| Wet stripping | Phenol/tetrachloroethylene, o-dichlorobenzene, Phenol, p--toluene, Sulfonic acid, Hydrogen peroxide (H_2O_2), Sulfuric acid (H_2SO_4), Chromium (III) oxide (Cr_2O_3) -Sulfuric acid (H_2SO_4), Ammoniasolution |
| Ion implantation | Arsine <g>, Arsenic compound <s>, Phosphorus compound, phosphine <g>, Boron compound, diborane <g>, Antimony trioxide <S>, antimony trichloride <L> |
| Epitaxy | Silicon tetrachloride, silane, dichlorosilane, trichlorosilane |
| Metallization | Aluminum, gold, silver, nickel, titanium, chromium |

방사선에 흔하게 노출될 수 있다. 공정 운전자는 웨이퍼 카세트(최근; 25개/카세트)를 운반하고 줄곧 서서 일해야 하는 직무특성 때문에 인간공학적 작업요인에도 높은 빈도(frequency)로 노출된다. 웨이퍼 가공 공정의 본질적인 위험 잠재요인에도 불구하고 근로자가 노출될 수 있는 화학물질의 수, 노출수준 그리고 부산물에 대한 정보를 소개한 연구는 거의 없다. 웨이퍼 가공 공정의 원리와 공정별로 발생하는 주요 유해인자에 대해서는 박동욱 등(2011)이 보고한 “반도체 웨이퍼 가공 공정 및 잠재적 유해인자에 대한 고찰”에 정리되어 있다.

웨이퍼 가공 근로자 생식독성 역학연구에서는, 웨이퍼 가공 근로자를 단순히 fab과 non-fab으로 분류하면 생식독성 위험이 나타나지 않거나 희석되는 것을 확인했다. 그러나 연구 대상자를 fab 공정, 직무, 공정에서 발생하는 유해인자 노출수준에 따라 세분해서 분류할 경우 생식독성의 위험이 분명하게 드러났다. 따라서 웨이퍼 가공 근로자가 일했던 공정과 직무 그리고 유해인자에 대한 노출정보를 활용할 수 있다면 생식독성과 직무관련성 여부는 물론 원인인자를 더 분명하게 규명할 수 있다.

1. 생식독성-자연유산을 중심으로-

지금까지 보고된 웨이퍼 가공 공정 근로자의 생식독성 관련 논문은 자연유산(spontaneous abortion, SAB)이 10편, 월경 주기 이상이 3편(Chen 등, 2002; Gold 등, 1995a; Gold 등, 1995b) 선천성기형(congenital anomalies)(Lin 등, 2008)과 임신 지연(Chen 등, 2001), 남자 근로자 생식능력(Samuels 등, 1995)이 각각 1편이다. 1988년에 Pastides 등(1995)이 처음으로 포토와 확산 공정 근로자가 non-fab근로자 보다 자연유산의 위험이 높다는 것을 보고했다. 이를 계기로 1992년 12월에 미국 반도체 협회(Semiconductor Industry Association, SIA라 함)의 지원을 받아 Schenker 등(1995)이 미국 14개 웨이퍼 가공 공정 근로자의 자연유산 위험을 조사하였다. 또 1993년 5월 Jones Hopkins대학(Gray 등, 1993)이 IBM의 지원을 받아 미국 동부에 있는 2개 IBM 웨이퍼 가공 공정 근로자의 자연유산의 위험을 조사하였다. 독립적으로 수행된 이 연구들에서도 자연유산의 위험이 non-fab근로자에 비해 유의하게 높았으며 유의한 공정과 유해인자까지 밝혀냈다.

본 원고에서는 웨이퍼 가공 근로자를 분류한 방법에 따라 자연유산 위험의 차이를 비교했다(Table 2 참조). 첫째, 연구대상 근로자를 fab과 non-fab으로 단순히 분류한 연구에서는 자연유산의 위험이 드러나지 않거나 그 위험이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 fab공정을 하부 공정이나 직무에 따라 연구대상자를 더 자세히 분류하면 생식독성의 위험이 높은 공정과 직무가 분명하게 드러났고 그 위험이 증가하는 경향도 나타났다(Table 2에서 *표시 참조). 그러나 일부 연구에서는 이러한 경향이 관찰되지 않았다(Elliott 등, 1999; Shusterman 등, 1993).

Table 2. Comparison of spontaneous abortion risk by exposure surrogate used to classify wafer fabrication workers in SAB epidemiologic studies

| Study | RR or OR (95% CI) | Exposure surrogate |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Pastides et al (1988) | 1.75(0.8-3.3) 2.18(1.1-3.6) | Photo vs non-fab * Diffusion vs non-fab * |
| Shusternman et al (1993) | 0.87(0.45-1.60) | Fab vs non-fab |
| Schenker et al (1995) | 1.43(0.95-2.09) 1.78(1.17-2.62) 1.17(0.68-1.93) | Fab vs non-fab Masking vs non-fab * Dopant & thin film vs non-fab * |
| Beaumont et al (1995) | 1.25(0.63-1.76) 1.67(1.04-2.55) 1.78(1.17-2.62) 2.08(1.27-3.19) | Fab vs non-fab Photo vs non-fab * Masking vs non-fab * Etching vs non-fab * |
| Eskenazi et al (1995) | 1.25(0.63-1.76) 1.30(0.59-1.84) 1.39(0.51-1.96) | Fab vs non-fab Masking vs non-fab Dopant & thin film vs non-fab |
| Gray et al(1993) | 1.1(0.8-1.6) | Fab vs non-fab |
| Pinney et al(1996) # | 1.62(0.77-3.39) | Fab vs non-fab |
| Elliot et al(1997) | 0.65(0.30-1.40) 0.58(0.26-1.30) | Fab vs non-fab Fab vs non-fab |

RR: relative risk, OR: odd ratio

#: Elliot et al(1997) 논문에서 인용함. 원본을 구할 수 없었음.

*: 연구대상자를 Fab내 하부 공정별로 다시 분류해서 유의성이 밝혀지거나 그 관련성이 더 커짐

둘째, Fab 공정에서 발생하는 특정 유해인자의 노출여부와 수준에 따라 연구 대상자를 분류한 경우에도 자연유산의 위험이 유의하게 나타났다(Table 3 참조). Fab공정에서 자연유산을 초래한 구체적인 원인 인자들이 밝혀진 것이다. 특정 유해인자들(EGE, IPA, cleaning solvents, acids, radiation, stress 등)의 노출수준과 자연유산의 연관성을 연구한 논문 3편(Swan 등, 1995; Elliott 등, 1999; Eskenazi 등, 1995)에서도 유사한 경향이 관찰되었다. Elliott 등(1999)의 연구를 제외한 역학연구에서는 웨이퍼 가공공정의 화학물질(EGE, PR, IPA, Xylene, Acetone, butyl acetate 등)과 스트레스 노출이 자연유산이 발생하는 데 유의하게 영향을 끼치는 것을 밝혔다.

자연유산 외에 생식독성 역학연구에서도 이와 비슷한 경향이 관찰되었다. Gold 등(1995)은 웨이퍼 가공 여성 근로자 451명을 직무별로 분류하여 연구한 결과,

non-fab 근로자에 비해 감독자 그룹(RR=2.46, 95% CI=1.19-3.63)과 포토 그룹(RR=1.83, 95% CI = 0.94-2.88)에게서 월경 주기 이상(월경 주기 35일 이후 또는 24일 이전)의 위험이 유의하게 높은 것을 밝혀냈다. 그리고 Hsieh 등(2005)은 대만 반도체 여성 근로자를 fab 내의 공정으로 구분하여, 포토(OR=4.4, 95% CI=1.7-11.4)와 확산 공정(OR=3.8, 95% CI=1.3-11.6)의 직무가 월경 주기와 유의한 연관성이 있는 것을 발견했다.

2. 암 위험 및 사망

지금까지 실시된 웨이퍼 가공 공정 근로자의 암 위험과 사망률에 대한 역학연구 논문은 8편에 불과하다. 영국 4편, 미국 3편 그리고 우리나라 1편이다. 보고서는 영국 HSE(Health Safety Executive)가 수행한 2편이 있다. 이 중 1편은 논문으로 발표되었고, 나머지 1편은 보고서로 나와 있지만(Darnton 등, 2010) 아직 논문으로 발표되지 않았다(Table 4). 논문 8편은 모두 대규모 회사(IBM 등)에서 얻은 연구 결과물로 아직 여러 나라(일본, 중국, 대만, 싱가포르, 말레이시아 등) 다양한 환경과 사례가 연구되지는 못했다. 역학연구 방법도 일반인의 사망률과 비교한 표준화 사망비(standardized mortality study, SMR) 연구로서 건강근로자영향(healthy worker effect, HWE)를 보정하지 못하는 한계점이 있다.

아직 암 발병과 사망을 초래한 구체적인 원인인자를 추정된 연구는 없었다. 암 위험 또는 사망과의 직무 관련성을 심층적으로 분석한 연구는 미국의 연구 2 편(Beall 등, 2005; Boice 등, 2010)에 불과하다. 이 연구들은 연구대상자를 직무(job title)와 다른 노출변수를 조합하여 분류한 다음 이 그룹들의 암 위험이나 사망을 일반인의 사망률과 비교하여 직무관련성 여부를 규명했다. 세계적으로 1960년대에 반도체 산업이 시작된 것을 감안하면 웨이퍼 가공공정 근로자의 암 위험과 사망에 대한 연구는 여러 측면(연구논문 수, 연구대상이 된 나라, 연구대상이 된 회사 규모, 연구방법 등)에서 볼 때 충분하지 않은 것으로 판단된다.

1) 영국사례

반도체 웨이퍼 가공 근로자의 암 위험은 1985년 영국에서 처음 보고되었다. 이 후 영국에서 2005년

Table 3. Comparison of spontaneous abortion risk by specific agents or exposure level used to classify wafer fabrication workers in SAB epidemiologic studies

| Study | Agent assessed | Exposure level | RR or OR(95 % CI) |
|-------------------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|
| Correa et al. (1996) | EGE | High vs no | 2.8(1.4-5.6) |
| Schenker et al. (1992) [#] | EGE | Exposure vs no | 1.66(1.02-2.59) |
| | EGE | High exposure vs no | 3.38(1.61-5.73) |
| | PR/developer | High exposure vs no | 2.54(1.41-4.12) |
| | Xylene | High exposure vs no | 2.72(1.51-4.37) |
| | n-Butyl acetate | High exposure vs no | 2.40(1.09-4.47) |
| | Acetone | Exposure vs no | 2.00(1.29-2.95) |
| | Isopropylalcohol | Exposure vs no | 1.67(1.07-2.52) |
| Gray et al. (1993) [#] | Xylene | Exposure vs no | 1.6(1.1-2.5) |
| | n-Butyl acetate | Exposure vs no | 1.7(1.1-2.5) |
| | Acetone | Exposure vs no | 1.7(1.1-2.5) |
| | HMDS | Exposure vs no | 1.8(1.1-2.8) |
| Swan et al. (1995) [#] | EGE | Exposure vs no | 1.56(1.02-2.31) |
| | | High exposure(2,3) vs no | 2.40(1.24-4.11) |
| | Xylene | Exposure vs no | 1.35(0.88-2.03) |
| | | High exposure(2,3) vs no | 2.31(1.39-2.37) |
| | n-Butyl acetate | Exposure vs no | 1.49(0.97-2.20) |
| | | High exposure(2,3) vs no | 2.53(1.34-4.23) |
| | Fluoride | Exposure vs no | 1.79(1.22-2.54) |
| | | High exposure(2,3) vs no | 1.69(0.98-2.75) |
| | Acetone | Exposure vs no | 1.86(1.26-2.64) |
| | | High exposure(2) vs no | 1.83(1.04-3.01) |
| | Isopropylalcohol | High exposure(2) vs no | 1.76(1.08-2.74) |
| | | Exposure vs no | 1.62(1.06-2.37) |
| Elliot et al. (1999) ^{\$} | EGE | Exposure vs no | 0.46(0.10-2.11) |
| | | Exposure vs no | 0.00(0-18.48) |
| | Propylene GE | Exposure vs no | 0.45(0.05-3.89) |
| | Fluorides | Exposure vs no | 1.44(0.49-4.18) |

RR: relative risk

OR: odds ratio

= adjusted by logistic regression for smoking, age, education, income, ethnicity, pregnancy history, pregnancy start year and stress question

\$ = the crude OR

EGE = ethylene glycol ethers

Exposure level 0-3 : ranged from no exposure(0) to highest exposure(3)

Exposure 1,2,3 : exposure

High exposure (2 or 2,3) = women exposed at level 1 are not included in higher level exposure analyses

까지 논문 4편이 보고되었지만 여기서도 직무관련성을 확실히 밝히지 못했다. 이들 논문의 저자들도 인정한 바와 같이, 회사에 직무관련성을 밝힐 수 있는

과거 노출정보(직무타이틀, 공정 구분 등)가 충분하지 않아 단지 근무기간으로만 근로자를 분류했기 때문이다. 맨 처음 Sorahan 등이 수행한 연구 2편(1985

Table 4. Comparison of retrospective exposure surrogates used in cancer risk epidemiologic studies of wafer fabrication workers (Park et al., 2011)

| Authors | Study type | Country (name of plant) | Number of plants | Information sources on work history and work-related exposures | Exposure surrogates used to classify study subjects |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sorahan et al. (1985) | SMR/SRR | UK | 1 | Company personnel records | Facility/employment status and durations (0 - 4, 5 - 9, 10 - 14, >15 years) |
| Sorahan et al. (1992) | SMR/SRR | UK | 1 | Company personnel records | Facility/employment status and durations (0 - 4, 5 - 9, 10 - 14, >15 years) |
| McElvenny et al. (2003) | SMR/SRR | UK | 1 (Scottish) | Four sources within company (personnel/payroll/pension/occupational health) | Facility/exposure duration (latency) (< 10 ³ 10 years) |
| Beall et al. (2005) | SMR | US (IBM) | 3 (East Fishkill/Burlington/San Jose ¥) | IBM's electronic personnel file (position/hire date and end date/location code/division name/department code/department name/job code/job title) | Facility/years since first record of employment and years worked/potential exposure/job title |
| Nicholas and Sorahan (2005) | SMR/SRR | UK | 1 | Company personnel record | Facility/year of hire/period from 1st employment/duration of employment |
| Bender et al. (2007) | SIR (cancer incidence) | US (IBM) | 2 (East Fishkill/San Jose ¥) | IBM's electronic personal file (position/hire date and end date/location code/division name/department code/department name/job code/job title) | Facility/years since first record of employment and years worked/potential exposure |
| Boice et al. (2010) | SMR/RR | US | 2 large companies located in 10 cities in five states | Company electronic work history information for job and exposure classification | Occupation (fab/non-fab)/duration of employment and job title/occupation and manufacturing eras |
| Darnton et al. (2010) | SMR/SRR | UK | 1 National Semiconductor UK Ltd. at Greenock | Company historical documents, interviews with long-serving employees and questionnaire | Occupation (fab/non-fab)/duration of employment and job title (no results)/qualitative exposure assessment: carcinogens, radiation, group of chemicals and shift work (yes/no) |
| Lee et al. (2011) | SMR/SIR | South Korea | 5 companies and 8 factories | No description of the methods used to collect work history data or information and to classify fabrication workers | Hire date/job title/years worked/person-years |

¥: facility to develop, manufacture, and package storage product devices such as hard disk drivers, network servers, magnetic tape drivers, and microdrives.

Abbreviations

SMR = standardized mortality ratio

SRR = standardized cancer registration ratio 0.99(0.64-1.47)

SIR = standardized cancer incidence ratio

RR = relative risk

년과 1992년)은 영국 West Midland에 있는 반도체회사에서 얻은 결과였다. 1985년 첫 연구에서 여성 근로

로자에게서 나타난 흑색종(melanoma)의 발생률이 일반인보다 유의하게 높은 것을 발견해서, 이후 7년간 추적 조사했지만 유의성이 더 이상 관찰되지 않았다(Sorahan 등, 1992).

1998년 영국 HSE는 스코트랜드 Greenock에 있는 National Semiconductor Ltd(NSUK)에서 집단적으로 발생한 암의 원인인자를 규명하기 위한 역학조사를 수행했다. 1970년에서 1990년 사이에 근무한 여성근로자(n=2,262)에게서 나타난 폐암, 위암, 유방암 사망률이 일반인에 비해 유의하게 높은 것을 발견했다. 하지만 이 연구는 자세한 과거 직무노출자료가 없어 이러한 암 발생이 직무와 연관되었는지 밝히지 못했다. 이 결과는 McElvenny 등(2003)이 논문으로 발표했다. 이 후 HSE는 1999년까지 동일한 연구대상자(남자 2,126명, 여자 1,262명)의 암 발생률을 추적했다. 이 연구에서는 설문을 통해 직무관련 변수(직무 타이틀, 공정 등)와 발암물질을 포함한 특정 유해인자에 대한 노출을 추정했다. 이전 연구(McElvenny 등, 2003)에서 보고한 여성 근로자의 유방암, 폐암, 위암 등의 증가가 직무와 관련이 없다고 결론지었다. 그러나 이 보고서에는 구체적인 노출추정 방법을 설명하지 않았고, 직무별 암 위험 결과도 제시하지 않았다. 그리고 이 보고서는 아직 논문으로 발표되지 않은 상황이다(Darton et al., 2011).

영국에서 보고된 논문 4편과 보고서 2편에서는 반도체 공정과 질병과의 관계를 확실하게 규명하지 못한 것으로 판단된다. 이미 언급한 대로 연구 대상 사업장에서 직무관련성을 밝힐 수 있는 직무, 공정, 유해인자 노출 등과 같은 과거 노출정보가 없었기 때문이다.

2) 미국사례

미국에서는 2005년 이후에 논문 3편이 보고되었다. 2편(Beall 등, 2005; Bender 등, 2007)은 IBM 근로자를 대상으로 얻은 결과물이다. 여기서는 영국에서 보고된 연구보다 자세한 과거 노출정보(웨이퍼 생산 시기 구분, 직무타이틀, 특정 유해인자 그룹에 대한 정성적인 노출평가 등)를 활용하여 웨이퍼 가공 근로자를 분류했다. IBM 등 연구대상 회사가 1960년대부터 보관해 온 근로자의 과거 노출정보(공정, 직무 등)와 건강장해(암 등)가 담긴 디지털 자료를 활용하여 직무가 암 위험과 사망에 끼치는 영향을 분

석할 수 있었다.

이 중 Beall 등(2005)은 1965년에서 1999년 사이에 일했던 웨이퍼 가공 근로자 126,836명의 사망률을 연구한 결과, 공정 정비 직무(process equipment maintenance)가 중추신경계암(central nervous system cancer)과 유의한 연관성(SMR= 2.47, 95 % CI=1.18-4.54)이 있음을 밝혀냈다. 이 결과는 근로자의 직무를 3개 그룹(운전자, 공정정비자, 감독자 등)으로 분류하여 얻은 것이다.

하지만 Boice 등(2010)은 웨이퍼 가공 직무요인과 암 발생이나 사망의 연관성을 발견하지 못했다. 이 연구에서는 웨이퍼 가공 근로자 중에서 정비작업자를 따로 분류하지 않고 운전자와 같은 노출군으로 통합했다. 이는 정비작업자를 운전자와 따로 분류한 Beall 등(2005)의 분류와는 그 방법이 달랐던 것이다. Boice 등(2010)이 운전자와 정비작업자를 묶은 이유는 최근(구체적인 시기 언급하지 않음)에 운전자와 정비작업자의 직무가 서로 구분되지 않을 만큼 일반적이 되었기 때문이라고 했다. 그러나 미국에서 노출되는 시기가 유사한(Beall 등의 연구: 1965-1999, Boice 등의 연구: 1968-2002) 근로자를 두 연구에서 서로 다르게 분류한 것은 중대한 논란이 될 수 있다. 정비작업자는 직접 공정장비를 정비하고 세척하며 각종 기계 및 장비를 다루고 화학물질을 교체하는 등의 직무를 수행하기 때문에 유해인자의 노출위험이 운전자보다 더 높은 것으로 잘 알려져 있다. 이런 이유 때문에 Hammond 등(1995)도 웨이퍼 가공 근로자를 공정별로 3개 그룹(운전자, 감독자, 정비작업자)으로 분류하도록 권고했다. 만약 유해인자 노출 위험이 높은 정비작업자를 운전자와 유사한 그룹으로 함께 묶을 경우, 정비작업자의 노출위험이 희석될 수 있어서 분류 오류가 발생할 가능성이 있다.

3) 우리나라 사례

최근 Lee 등(2011)은 우리나라 8개 반도체 공장(웨이퍼 가공과 칩 제조 공장이 모두 포함된 것으로 판단됨) 근로자 113,443명의 암 사망률을 일반인의 그것과 비교했다. 또 백혈병, 갑상선, non-Hodgkins lymphoma(NHL)의 발생률을 여러 노출 특성별(직무, 노출기간 등)로 분류한 근로자 그룹별로 비교했다. 코호트 기간은 1998년에서 2008년 사이였다. 연구에 따르면 암 발생률에 있어서 일반인에 비해 유의한

증가를 나타낸 암은 여성근로자에게서 NHL (SIR=2.31, 95% CI=1.23-3.95), 남성 근로자에게서 갑상선암(SIR=2.11, 95% CI=1.49-2.89)이었다. NHL은 특히 칩 제조 공정의 여성 근로자(operator)에게서 유의한 연관(SIR=3.15, 95% CI = 1.02-7.36)이 있었다. 한편 웨이퍼 가공 공정 직무(process engineer; to improve the process stream by programming)의 남성 근로자에게는 갑상선암(SIR=2.50, 95% CI = 1.29-4.38)이 유의하게 증가하고 있는 것으로 보고했다. 그리고 논란이 되었던 백혈병은 직무와 연관이 없는 것으로 나타났다. 여기에서는 논문에서 언급하지 않은 노출 평가 측면의 한계점을 간략하게 설명하였다.

첫째, 근로자를 분류하는 데 사용한 각종 직무관련 노출정보(직무타이틀 등)를 어떻게 구했는지에 대한 설명이 없다. 회사에서 제공한 자료였는지 아니면 설문을 통해서 얻은 자료인지 등 노출평가부분에서 언급해야 할 일반적인 내용이 없다.

둘째, 근로자를 직무에 따라 분류한 근거와 판단에 대한 자세한 설명이 없다. 연구결과를 서로 비교하기 위해서는 분류 근거를 분명하게 명시해야 한다. 예를 들면 운전자, 정비작업자(service engineer), 공정 유지자(process engineer) 등에 대한 직무내용과 노출특성의 차이를 설명하고 이들을 어떻게 분류했는지에 대한 설명이 필요하다.

셋째, 공정, 노출기간, 직무시작 시기 등을 함께 고려하지 않고 직무타이틀로만 연구 대상자를 분류하여 분류 오류가 일어났을 가능성이 있다. 직무는 공정특성에 따른 유해인자의 종류, 수준 등의 노출차이를 반영하지 못하기 때문이다. Hammond 등(1995)은 노출분류 오류를 줄이기 위해 웨이퍼 가공 공정 근로자를 3단계(공정 → 직무 → 유해인자)로 계통별로 조합해서 분류하는 것이 좋다고 권고했다. 연구대상자를 웨이퍼 가공 구분(fab과 non-fab) → 공정(포토, 식각, 이온주입 등) → 직무 등의 단계별로 분류해야 분류 오류를 줄일 수 있다. 만약 공정을 구분하지 않은 직무일 경우 그 이유(유사공정, 물리적으로 서로 가까이에 위치 등)를 분명하게 설명하는 것이 좋다. 직무를 기반으로 다른 노출변수들을 매트릭스로 묶어서 분류해야만 분류 오류를 줄일 수 있고 직무관련성을 분명하게 밝힐 수 있다.

넷째, 웨이퍼와 칩의 생산시기에 따른 구분이 없

다. 코호트 기간인 1998년에서 2008년까지 생산방법, 공정운영방법, 직무 방법 등이 비슷하다고 가정하는 것은 문제가 있다. 웨이퍼 생산시기에 따라 공정이나 작업방법이 변하고, 이에 따라 유해인자 노출수준이 크게 차이가 난다는 것은 일반적인 사실이기 때문이다. 미국에서 보고된 연구 3편(Beall 등, 2005; Bender 등, 2007; Boice 등, 2010)에서는 웨이퍼 생산을 3개 시기로 구분하여 다른 노출정보와 매트릭스로 묶어 생산시기에 따른 노출의 차이를 고려했다.

다섯째, 반도체 근로자의 암 사망률을 직무나 공정으로 구분하지 않아 직무관련 여부를 평가하지 않았다. 암 사망률을 공정(fab과 non-fab, 또는 웨이퍼 가공과 칩 제조), 직무(운전자, 정비작업자 등), 노출기간 등에 따라 구분해야만 특정 직무, 공정요인의 영향을 파악할 수 있다.

마지막으로, 1998년 이전 현재보다 열악했을 것으로 판단되는 시기에 근무했던 근로자, 이들이 노출된 공정, 직무자료에 대한 설명이 없다. 다른 연구들에 비해 코호트 기간은 1998년 이전 초창기를 포함하지 못했다.

연구결과를 해석함에 있어서 노출정보의 부족과 연구대상자 추적의 한계 등으로 연구자체가 가지는 한계점을 충분히 설명하는 것이 연구간 비교는 물론 향후 연구에도 도움이 된다. 예로서 건강근로자효과(healthy worker effect, HWE라 함)는 특정 직업에 종사하는 근로자의 사망률이나 질병 발생률은 일반인의 그것과 비교할 경우 상당 부분 연구결과를 통계학적 연관성이 없는 쪽으로 영향을 미칠 수 있다. Lee 등(2011)의 연구에서 나타난 HWE는 지금까지 웨이퍼 가공 공정에서 보고된 다른 연구보다 크다(특히 암 사망률)(Table 5 참조). HWE가 연구 결과에 미친 영향과 이를 최소화할 수 방법 등에 대한 한계점을 기술하는 것이 필요하다.

지금까지 국내외에서 보고된 반도체 웨이퍼 가공 근로자의 암 위험과 사망에 대한 역학조사 논문에서 연구대상자를 분류하는 데 사용했던 과거 노출정보를 고찰해 본 결과, 사용한 노출정보의 양, 수준, 깊이 등에서 서로 크게 차이가 있는 것을 확인했다(Table 4 참조). 대부분 미국과 영국의 대규모 공장에서 보고된 자료이다. 미국 연구(Beall 등, 2005; Bender 등, 2007; Boice 등, 2010)들은 다른 연구보다 자세한 과거 노출정보(생산시기 구분, 직무타이틀,

Table 5. Comparison of cancer risk and mortality cohort period used in epidemiologic studies of wafer fabrication workers

| Authors | Country studied | Cohort periods | Death of all causes (SMR) | Death of all cancer (SMR) | All cancer incidence (SIR) or registration (SRR) |
|-------------------------|-----------------|----------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------|
| Sorahan et al. (1985) | UK | <1970 | 0.71 | 1.1 | NA |
| | | 1970-79 | 0.71 | 0.64 | NA |
| Sorahan et al. (1992) | UK | 1970-89 | 0.72 | 0.79 | NA |
| | | 1970-88 | NA | NA | 0.96 |
| McElvenny et al. (2003) | UK | 1998-00 | | | |
| | | Male | 0.4 (0.27-0.59) | NA | 0.99 (0.64-1.47) |
| | | Female | 0.75 (0.54-1.01) | NA | 1.11 (0.83-1.45) |
| Nichols et al. (2005) | UK | 1970-2002 | 0.80 (0.71-0.89) | 0.77 (0.63-0.92) | 1.0 (0.87-1.13) |
| Beall et al. (2005) | US | 1965-1999 | 0.65 (0.64-0.67) | 0.78 (0.75-0.81) | NA |
| Bender et al. (2007) | US | 1976-1999 | 0.81 (0.77-0.85) | NA | NA |
| | | 1988-1999 | 0.87 (0.82-0.92) | NA | NA |
| Boice et al. (2010) | US | 1983-2002 | 0.54 (0.51-0.57) | 0.74 (0.66-0.83) | NA |
| Lee et al. (2011) | Korea | 1998-2008 | | | |
| | | Male | NA | 0.25 (0.21-0.29) | 0.86 (0.74-0.98) |
| | | Female | NA | 0.66 (0.55-0.80) | 0.88 (0.74-1.03) |

NA: Not available

생산초기 정보 등)를 사용했지만, 공정에 대한 구분이 없고 정비작업자에 대한 분류에서 서로 차이점이 있었다. 웨이퍼 가공 공정 근로자에게서 발생하는 암 위험에 대한 원인과 직무연관성을 보다 분명하게 밝히기 위해서는 여러 나라의 웨이퍼 가공 공정과 환경, 직무를 대상으로 수행한 연구결과가 필요하다. 무엇보다 자연유산 위험 역학연구에서와 같이 반도체 근로자의 암 위험과 사망 역학연구에서도 구체적인 공정, 구체적인 유해인자 등에 대한 과거 노출정보를 추정하고 이에 따른 위험을 평가해야 한다.

공정 근로자의 암 위험과 관련된 논문 8편 중 직무연관성을 밝힐 수 있는 과거 노출정보를 활용한 연구는 단지 2편에 불과하고, 이 연구들 간의 직무분류방법에도 서로 차이가 있었다. 따라서 웨이퍼 가공 직무와 암 위험의 관계를 더 명확히 규명하기 위해서는 여러 나라의 다양한 직무 환경에서 보다 구체적인 노출정보(직무, 유해인자 등)를 평가한 결과가 필요할 것으로 판단된다.

References

- 박동욱, 변혜정, 최상준, 정지연, 윤충식, 김치년, 하권철, 박두용. 반도체 웨이퍼 가공 공정 및 잠재적 유해인자에 대한 고찰, 대한 직업환경의학회지, 2011; 23 (3): 333-342.
- Beall C, Bender TJ, Cheng H, Herrick R, Kahn A, Matthews R, Sathiakumar N, Schymura M, Stewart J and Delzell E. Mortality among semiconductor and storage device-manufacturing workers. J Occup and Environ Med 2005; 47: 996-1014.
- Beaumont JJ, Swan SH, Hammond SK, Samuels SJ, Green RS, Hallock MF, Dominguez C, Boyd P and Schenker MB. Historical cohort investigation of spontaneous abortion in the semiconductor

IV. 결 론

반도체 웨이퍼 가공 근로자에게 논란이 되고 있는 주요 건강위험은 생식독성과 암이다. 생식독성 중 자연유산은 웨이퍼 가공 직무와 관련이 있다는 것과 주요 유해요인도 밝혀졌다. 그러나 웨이퍼 가공 근로자의 암 발생 위험은 직무 관련 여부조차도 아직 명백히 밝혀지지 않은 상태이다. 이것은 자연유산 역학연구에서 사용했던 과거 노출정보인 공정, 직무, 유해인자 등 구체적인 과거노출평가가 이루어지지 않았기 때문이다. 지금까지 보고된 웨이퍼 가공

- health study: Epidemiologic methods and analyses of risk in fabrication overall and in fabrication work groups. *Am J Ind Med* 1995; 28: 735-750.
- Bender TJ, Beall C, Cheng H, Herrick RF, Kahn AR, Matthews R, Sathiakumar N, Schymura MJ, Stewart JH and Delzell E. Cancer incidence among semiconductor and electronic storage device workers. *Occup Environ Med* 2007; 64: 30-36.
- Boice Jr JD, Marano DE, Munro HM, Chadda BK, Signorello LB, Tarone RE, Blot WJ and McLaughlin JK. Cancer mortality among US workers employed in semiconductor wafer fabrication. *J Occup and Environ Med* 2010; 52: 1082-1097.
- Chen PC, Hsieh GY, Wang JD and Cheng TJ. Prolonged time to pregnancy in female workers exposed to ethylene glycol ethers in semiconductor manufacturing. *Epidemiology* 2002; 13: 191
- Correa A, Gray RH, Cohen R, Rothman N, Shah F, Seacat H and Com M. Ethylene glycol ethers and risks of spontaneous abortion and subfertility. *Am J Epidemiol* 1996; 143: 707-717.
- Darnton AJ, Wilkinson S, Miller B, MacCalman L, Galea K, Shafrir A, Cherrie J, McElvenny D and Osman J. A further study of cancer among current and former workers at National Semiconductor (UK) Ltd, Greenock: results of an investigation by the Health and Safety Executive and Institute of Occupational Medicine United Kingdom, 2010. HSE.
- Elliott RC, Jones JR, McElvenny DM et al. Spontaneous abortion in the British semiconductor Health Study. *Am J Ind Med* 1999; 36:557-572.
- Eskenazi B, Gold EB, Lasley BL, Samuels SJ, Hammond SK, Wight S, O'Neill Rasor M, Hines CJ and Schenker MB. Prospective monitoring of early fetal loss and clinical spontaneous abortion among female semiconductor workers. *Am J Ind Med* 1995a; 28: 833-846.
- Gold EB, Eskenazi B, Hammond SK, Lasley BL, Samuels SJ, O'Neill Rasor M, Hines CJ, Overstreet JW and Schenker MB. Prospectively assessed menstrual cycle characteristics in female wafer fabrication and non-fabrication semiconductor employees. *Am J Ind Med* 1995a; 28:799-815.
- Gold EB, Eskenazi B, Lasley BL, Samuels SJ, O'Neill Rasor M, Overstreet JW and Schenker MB. Epidemiologic methods for prospective assessment of menstrual cycle and reproductive characteristics in female semiconductor workers. *Am J Ind Med* 1995b; 28: 783-797.
- Gray RH, Corn M, Cohen R, Correa A, Hakim R, Hou W, Shah F, Zauer H. Final Report: The Johns Hopkins University Retrospective and Prospective Studies of Reproductive Health Among IBM Employees in Semiconductor Manufacturing, Baltimore, MD: The Johns Hopkins University. 1993.
- Hammond SK, Jines CJ, Hallock MF, Woskie SR, Abdollahzadeh S, Iden R, Anson E, Ramsey F and Schenker MB. Tiered exposure-assessment strategy in the semiconductor health study. *Amer J Ind Med* 1995; 28: 661-680.
- Hawkinson TE and Korpela DB. "Chemical hazards in semiconductor operations" in Bolmen RA *Semiconductor safety handbook: safety and health in the semiconductor industry*. Noyes Publication in United States of America. 1998; pp. 163-179.
- Hsieh G, Wang J, Cheng T and Chen P. Prolonged menstrual cycles in female workers exposed to ethylene glycol ethers in the semiconductor manufacturing industry. *Occup Environ Med* 2005; 62: 510.
- Lee HE, Kim EA, JS Park and SK Kang. Cancer mortality and incidence in Korean semiconductor workers. *Safety and Health Work* 2011; 2: 135-147
- Lin M, Jung-Der WM, Scd G, Chang Y and Chen P. Increased risk of death with congenital anomalies in the offspring of male semiconductor workers. *Int J Occup Environ Health* 2008; 14: 112-116.
- McElvenny DM, Darnton AJ, Hodgson JT, Clarke SD, Elliott RC and Osman J. Investigation of cancer incidence and mortality at a Scottish semiconductor manufacturing facility. *Occup Med* 2003; 53:419-430.
- McElvenny DM, Darnton AJ, Hodgson JT, Clarke SD, Elliott RC and Osman J 2001a, *Cancer among current and former workers at National Semiconductor (UK) Ltd, Greenock: results of an investigation by the Healthand Safety Executive, HSE*. NicholsL and SorahanT. Cancer incidence and cancer mortality in a cohort of UK semiconductor workers, 1970-2002. *Occup Med* 2005; 55: 625-630.
- Pastides H, Calabrese EJ, Hosmer Jr DW and Harris Jr DR. Spontaneous abortion and general illness symptoms among semiconductor manufacturers. *J Occup and Environ Med* 1988; 30:543.
- Samuels SJ, McCurdy SA, Pocekay D, Katharine SH, Missell L and Schenker MB . Fertility history of currently employed male semiconductor workers.

- Am J Ind Med 1995; 28: 873-882.
- Schenker MB, Gold EB, Beaumont JJ, Eskenazi B, Katharine SH, Lasley BL, McCurdy SA, Samuels SJ, Saiki CL and Swan SH. Association of spontaneous abortion and other reproductive effects with work in the semiconductor industry. Am J Ind Med 1995; 28: 639-659.
- Sorahan T, Pope D and McKiernan M. Cancer incidence and cancer mortality in a cohort of semiconductor workers: An update. Br Med J 1992; 49: 215-216.
- Sorahan T, Waterhouse J, McKiernan M and Aston R. Cancer incidence and cancer mortality in a cohort of semiconductor workers. Br Med J 1985; 42: 546-550.
- Shusterman D, Windham GC and Fenster L. Employment in electronics manufacturing and risk of spontaneous abortion. J Occup and Environ Med 1993; 35: 381.
- Stewart J and Elkington K. "Electronics: Semiconductor manufacturing" in *Industrial hygiene aspects of plant operations* John Wiley and Sons Ltd. Pub, 1985. pp. 439-463.
- Swan SH, Beaumont JJ, Hammond SK, Vonbehren J, Green RS, Hallock MF, Woskie SR, Hines CJ and Schenker MB. Historical cohort study of spontaneous abortion among fabrication workers in the semiconductor health study: Agent level analysis. Am J Ind Med 1995; 28: 751-769.