

반도체 웨이퍼 가공 공정 역학 조사에서 과거 노출 평가 방법 고찰

박동욱[†]

한국방송통신대학교 환경보건학과
(2011. 2. 4. 접수/2011. 2. 19. 수정/2011. 2. 21. 채택)

Retrospective Exposure Assessment of Wafer Fabrication Workers in the Semiconductor Industry

Donguk Park[†]

Department of Environmental Health, Korea National Open University
(Received February 4, 2011/Revised February 19, 2011/Accepted February 21, 2011)

ABSTRACT

The objective of this study is to review retrospective exposure assessment methods used in wafer fabrication operations to determine whether adverse health effects including mortality or cancer incidence are related to employment in particular work activities and to recommend an appropriate approach for retrospective exposure assessment methods for epidemiological study. The goal of retrospective exposure assessment for such studies is to assign each study subject to a workgroup in such a way that differences in exposure within the workgroups are minimized, as well as to maximize the contrasts in exposure between workgroups. To reduce the misclassification of exposure and to determine if adverse health effects including mortality or cancer incidence are related to particular work activities of wafer fabrication workers, a minimum requirement of work history information on the wafer manufacturing eras, job and department at which they were exposed should be assessed. Retrospective assessment of the task that semiconductor workers performed should be conducted to determine not only the effect of a particular job on the development of adverse health effects including mortality or cancer incidence, but also to adjust for the healthy worker effect. In order to identify specific hazardous agents that may cause adverse health effects, past exposure to a specific agent or agent matrices should also be assessed.

Keywords: semiconductor industry, wafer fabrication, silicon wafer, retrospective assessment

I. 서 론

반도체 산업(semiconductor industry)에서 주요 공정은 모래(SiO₂)로부터 순수한 실리콘(silicon, Si)을 추출(환원)하여 원형 실리콘 웨이퍼(wafer)를 만들고 이를 가공(fabrication)하여(이하 웨이퍼 가공 공정) 전자부품 칩(chip)을 만드는(이하 칩 조립 공정) 과정이다. 웨이퍼 가공 공정 근로자들은 발암물질(인자)인 벤젠, 비소 및 비소화합물, 크롬화합물, 자외선, 이온화방사선(엑스레이 등), 황산, 트리클로로에틸렌, 사염화탄소, 아르신(arsine), 안티몬 화합물 등에 노출되었거나 노출되고 있지만 이들에 대한 노출 자료 및 정보는 알려진 것이 거의 없다.^{1,2)} 웨이퍼 가공 공정에서 사용하는 화학물질

수는 매우 많다(500-1,000여 종류).³⁾ 화학물질 외에도 방사선(전리 및 비전리 방사선), 교대작업, 심리적인 스트레스 등에 지속적으로 노출되고 있다.^{4,5)} 이들에 대한 노출 정도는 공학적인 기술 향상, 자동화된 기계 설비 증가, 가스검지기 설치, 공정 및 장비 밀폐 등으로 감소되고 있지만 누적된 과거 노출로 인해 발생할 수 있는 건강영향의 가능성은 여전히 남아 있다.

최근 사회적으로 논란이 되고 있는 반도체 근로자의 암과 같은 만성적인 건강장해는 웨이퍼 가공과 전자부품 칩 조립 사업장 근로자에게 발생한 것이다. 지금까지(2011년 1월 말 기준) 16명은 그들이 수행했던 공정, 직무(job), 일(work) 등이 건강장해와 연관이 있다고 주장하여 산업재해 신청을 하였으나, 산업재해 심의를 거친 10명 가운데 지금까지 단 한 명도 산업재해 인정을 받지 못했다(시사IN, 2011, 173호, 39페이지).

근로자의 직업이나 직무가 건강장해에 미치는 영향을 규명할 때 핵심적인 내용은 질병발생에 영향을 미쳤을

[†]Corresponding author : Department of Environmental Health, Korea National Open University
Tel: 82-2-3668-4707, Fax: 82-2-740-4701
E-mail : pdw545@knu.ac.kr

것으로 의심되는 유해인자, 직무, 일 등에 대한 과거 노출(past exposure)을 정확히 평가(assess)하는 것이다. 개별 사례는 전문가 그룹(혹은 위원회)에서 과거 일정 기간 동안 근로자가 수행했던 공정, 직무, 일 등을 정확하게 이해하고 평가하여 질병관련 여부를 결정하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 회사에서 제공하는 기록 및 정보와 함께 관련 근로자나 동료의 증언을 들어 과거 노출을 추정해야 한다. 한편, 집단 역학조사를 통해서 특정 직무가 특정 질병의 발생과 관련이 있는지 평가하기 위해서는 해당 직무가 속한 산업 혹은 사업장 전체 근로자 그룹에 대한 직무 노출평가를 해야 하는 것으로 개인 업무 관련 판정과는 다르다.

본 연구의 목적은 웨이퍼 가공 공정 근로자에 대한 역학 조사에서 수행한 과거 노출평가 변수와 방법을 고찰하였다. 또한, 웨이퍼 가공 공정에서 건강위험을 초래하는 유해요인과 직무를 이해하기 위해서 공정 흐름과 공정에서 발생하는 주요 유해인자를 간략하게 정리하였다. 이 고찰결과는 향후 개인 및 집단 역학조사에서 과거 노출을 추정하고 평가하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

II. 방 법

본 연구 고찰 대상은 반도체 산업 중에서 웨이퍼를 가공하는 공정에서 수행한 역학조사이다. 웨이퍼가공 공정 근로자를 대상으로 암 사망이나 발생위험을 밝히기 위한 역학조사에서 활용한 공정, 생산시기, 근로자 노출기간과 직무, 유해인자 발생 등에 대한 과거노출을 고찰하였다. PubMed와 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 본 연구에 맞는 연구결과를 선별하여 고찰하였다. 본 연구에서 고찰한 주요 연구 내용은 다음과 같다.

- 반도체 웨이퍼 가공 공정
- 반도체 웨이퍼 가공 공정에서 발생하는 유해인자
- 반도체 웨이퍼 가공 공정 근로자의 직무
- 반도체 웨이퍼 가공 공정 근로자 암 발생, 사망 역학 연구에서 활용한 과거 노출평가 내용과 방법

웨이퍼 가공 공정 흐름은 유해인자 노출과 관련된 주요 핵심 내용만 정리하였다. 자세한 공정 내용은 문헌들을 참조하면 된다.⁵⁻¹⁴⁾ 암, 사망 외 다른 건강장해(생식독성, 근골격계질환, 사고 등)에 대한 역학조사에서

활용한 과거 노출평가방법은 본 연구에서 고찰하지 않았다.

III. 반도체 웨이퍼 가공 공정 위험 요인

웨이퍼 가공은 실리콘 웨이퍼 기판(substrate) 위에 다양한 회로를 집적하고(integrated) 전자적 요소를 연결하는 장치(device) 공정이다. 또 가공된 웨이퍼를 추가 가공하고 조립하여 전자부품용 칩을 생산한다. 우리나라에서는 웨이퍼 가공과 칩 조립 공정이 분리된 사업장에서 이루어진다. 웨이퍼 가공 공정에서 훨씬 더 많은 화학물질을 사용한다. 따라서 웨이퍼 가공 공정을 유해인자 발생 측면에서 간략하게 정리하였다.

1. 공정 개요

웨이퍼 가공은 웨이퍼 기판 위에 마스크에서 설계된 회로를 집적(integrated circuit)하고 불필요한 부분을 화학물질로 제거한 후 전자 특성을 구현하는 반복적인 과정이다. 웨이퍼 가공 공정을 4개 핵심과정으로 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 회로 패턴: 산화, photolithography(이하 포토라 함), 식각 (etching), 스트리핑(striping)
- 회로 접합(junction formation): 확산(diffusion) 또는 이온주입(ion implantation)
- 실리콘 증착(에피택시)
- 금속 증착(metallization)

회로 패턴 공정은 웨이퍼 위에 산화 층을 만들고 감광액(photoresist, 이하 PR)을 얇게 코팅한 다음 자외선에 노출(노광)시켜 미리 설계된 마스크 회로를 기판으로 전달하는 과정이다. 이후 식각과 스트리핑을 통해 불필요한 부분을 화학물질(산, 염기, 유기용제 등)로 제거함으로써 회로 패턴을 구조화한다. 회로 접합 공정은 전류가 흐르지 않는 회로 패턴에 3족이나 5족 불순물(impurities)을 확산이나 이온주입 기술을 통해 증착함으로써 회로들을 전류에 의해서 접합(junction)시키는 과정이다. 대표적인 불순물은 아르신(가스), 삼산화비소(arsenic trioxide, 고체), 포스핀(기체), phosphorus trichloride, phosphorus oxychloride(액체), boron trichloride/or trifluoride(기체), diborane(기체) 등으로 독성이 크다. 에피택시(epitaxy)는 불순물이 들어간 웨이퍼(불순물 반도체) 위에 또 다른 실리콘 또는 산화막(SiO₂)을 덮는 증착(deposition) 공정으로 다시 회로 패턴, 접합을 반복할 수 있는 분리 틀을 만드는 것이다. 마지막으로 여러 겹으로 집적된 회로 장치들끼리 전류

Table 1. Chemical hazards by silicon wafer production³⁴⁾

Production areas	Particulates	Metals	Solvents	Acids	Caustics	Flammable gasses	Systematic and respiratory toxin
Wafer preparation	○		○	○	○		
Oxidation						○	
Photolithography			○	○	○		○
Etching				○			○
Junction formation		○				○	○
Metallization		○					

Table 2. Characteristics of chemical hazards in wafer fabrication

Process	Chemical hazards
Cleaning	Strong mineral acids
	Strong oxidizers
	Organic solvents
Oxidation	Hazardous atmospheres
Photolithography	Organic solvents
Wet etch	Strong mineral acids
	Organic solvents
Dry etch	Plasma etch by-products
	Halogenated materials
Diffusion/ion implantation	Highly toxic gases/vapors
	Hazardous atmospheres
	Organic solvents
Metallization	Heavy metals
Maintenance	Highly toxic and reactive by-products
	Organic solvents

가 흐르도록 전도성 금속(알루미늄, 은, 니켈, 금, 크롬, 티타늄 등)을 증착하여 금속배선을 만든다.

2. 발생하는 주요 유해인자 그룹

웨이퍼 가공 공정에서 발생될 수 있는(노출될 수 있는) 유해인자를 그룹별, 화학물질별 그리고 특성별로 정

리하였다. 구체적인 유해인자 종류와 농도(강도)는 생산 시기에 따른 공정 기술, 제품, 재료 그리고 직무(작업) 특성의 변화에 따라 달라진다.

실리콘 웨이퍼 기판 위에 여러 층(산화 층, PR, 에 피탁시, 금속 등)을 코팅하고 불필요한 부분을 반복하여 제거하는데 수 많은 화학물질(산, 염기, 유기용제, 금속 등)이 집중적으로 사용되기 때문에 이에 대한 근로자 노출은 일반적이다. 또한 웨이퍼 기판 위에 전자 회로 특성을 부여하기 위해 주입되는 불순물인 아르 신, 포스핀, 비소 화합물 등은 독성이 매우 크거나 안전상의 위험이 있다. 웨이퍼 가공 전 공정에서 화학물질 증기, 가스, 액체 등이 일반적이다(Table 1과 2 참조). 전리 및 비전리 방사선 에너지 노출 위험도 일어난다. 산화, 확산 등 용해로 공정에서 발생하는 적외선, 포토 공정의 자외선, 건식 식각 공정에서 라디오파, 그리고 이온주입 공정에서 고압전류 사용에 따른 엑스레이 등이 발생될 수 있다(Table 3 참조). 또 대부분 웨이퍼 가공 근로자는 서서 일해야 하는 직무 특성 때문에 인간공학적 요인에도 항상 노출된다. 획일화되고 격리된 직무환경(동일한 복장, 일정한 온도와 습도, 일정 수준의 소음, 일정한 공기 흐름, 자외선 파장이 제거된 불빛 등),⁹⁾ 제품 및 재료 손실, 생산 실적 등의 심리적인 스트레스 그리고 교대 작업에 따른 생체리듬 붕괴 등 건강 위험요인에 끊임없이 노출된다.

Table 3. Physical and ergonomic hazards by silicon wafer production³⁴⁾

Production areas	Ionizing radiation	RF	UV	Laser	Electrical	Ergonomic
Wafer preparation					○	○
Oxidation		○			○	○
Photolithography			○		○	○
Etching					○	○
Junction formation	○*	○		○	○	○
Metallization	○*	○			○	○

*X-ray radiation from high energy electrical sources.

IV. 웨이퍼 가공 공정 과거 노출 평가

웨이퍼 가공 공정에서 질병 발생의 원인이 될 수 있는 요인을 찾고 이에 대한 과거 노출을 정확하게 평가하는 것은 어렵다. 노출되는 유해인자의 종류가 매우 많고, 공정 특성상 이들은 복합적으로 발생되며 공정 기술이 빠르게 변화하기 때문이다. 더욱이 이미 지나가 버린 과거 일정 기간 동안에 일어났던 노출을 평가하는 것은 더 어렵다. 만약, 노출과 관련된 기록이 없다면 과거 노출에 대한 평가는 일정 부분 한계가 있을 수 밖에 없다. 많은 연구들이 반도체 공정 근로자가 과거에 노출된 자세한 직업 정보(직무, 공정, 노출된 유해인자 등)를 파악하지 못해 직무와 질병 발생과의 연관성을 밝히지 못했다.¹⁵⁻¹⁹⁾

웨이퍼 가공 직무가 질병 발생에 미치는 영향을 규명하기 위한 핵심은 연구대상 근로자를 노출 특성이 서로 다른 그룹으로 각각 분류하는 것이다. 같은 그룹 내에 있는 근로자의 노출은 서로 비슷하고 다른 그룹의 근로자들과의 노출은 유의하게 다르게 분류하는 것이다. 즉, 건강영향을 초래할 것으로 의심되는 위험 요인에 대한 노출 특성에 따라 근로자를 묶는 것이다. 건강영향을 초래할 수 있는 주요 위험 요인은 직무, 노출된 시기 그리고 노출된 유해인자의 특성(종류와 강도) 등이다. 웨이퍼 가공 공정의 역학 조사에서도 마찬가지로이다. 연구대상에 속하는 웨이퍼 가공 공정 근로자들을 그들의 공정, 직무, 시기, 유해인자, 고용기간 등에 대한 과거 노출을 평가하여 노출 특성이 서로 다른 그룹으로 각각 분류하는 것이다.

1. 산업, 사업장, 근무기간 등

조사대상 근로자가 일했던 산업, 사업장, 근무 기간 등에 근거해 근로자를 그룹으로 분류하고 그룹별 질병 발생 위험을 비교하는 경우다.^{1,15,17,20,21)} 이들은 가장 쉽게 구해서 활용할 수 있는 과거 노출평가 변수로서 과거 노출에 대한 자세한 정보를 구할 수 없을 때 사용된다. 이 변수에 의해 분류된 근로자 그룹은 노출이 모두 유사하다고 가정하지만 노출 특성이 큰 차이가 있을 수 밖에 없다. 유해인자에 대한 노출 특성이 확연히 다른 사무직과 공정 근로자가 함께 분류되어 노출 분류 오류가 확실히 일어나기 때문이다. 따라서, 이러한 변수들에 의해 분류된 근로자 그룹에서 질병 위험이 낮다고 하더라도 직무와 관련이 없다고 단정할 수 없다.

2. 부서, 공정, 직무 또는 매트릭스

특정 직무가 질병의 발생에 영향을 미쳤는지 알기 위

해서는 최소한 연구대상자를 부서, 공정, 직무 특성에 따라 분류하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 근로자에게 부여된 직무 코드, 일 등의 정보가 정확히 기록되어 있어야 한다. 웨이퍼 가공 공정 근로자는 크게 클린룸인 가공 공정 내부(이하 fab)와 외부(이하 non-fab)로 구분할 수 있다. 이 두 그룹 간의 노출 특성은 분명하게 차이가 있다. 이러한 노출 차이에 따른 근로자 구분은 단순한 질문 혹은 기록만으로도 가능하다. 그러나 클린룸 내부(fab)의 근로자를 유해요인 노출 특성에 따라 서로 다르게 분류하는 것은 복잡한 공정 및 작업 특성 때문에 쉽지 않다. 직무만을 근거로 분류하면 크게 공정운전자, 공정정비작업자 그리고 관리감독자로 분류할 수 있다. 이들을 다시 가공 공정과 유해인자 노출 특성에 따라 구분하는 기준과 방법은 역학 연구의 목적과 연구자의 판단에 따라 차이가 있다.

Hammond 등(1995)은 웨이퍼 가공 공정의 역학 조사 대상 근로자를 3단계 노출 특성에 따라 분류하였다. 1단계는 fab과 non-fab, 2단계는 공정에 따라 5개 또는 4개 그룹(포토, 식각, 감독자 등)으로 분류하였다. 마지막 3단계에서는 특정 유해인자의 정성적인 노출평가(1, 2, 3, 4)에 따라 근로자를 분류할 것을 제안하였다. 이 연구에서는 근로자를 공정 중심으로 분류하였지만 정비, 세척 등 특정 직무에 근거한 분류기준이 없었다.

Herrick 등(2005)은 미국 IBM 반도체 근로자들을 회사별로 부서(division)/공정(department)/직무(job)를 매트릭스로 묶어(DDJ라 표기) 근로자 그룹을 분류했다. 웨이퍼 가공 근로자를 DDJ 조합에 따라 15개 그룹으로 분류하였는데, Fab(운전자), 정비근로자(process equipment maintenance), 포장, 마스크 제작, 연구개발자 등 공정/직무 별로 근로자를 훨씬 세분화해서 분류한 것이 특징이다.²⁾ 각 그룹을 여러 노출 특성의 차이(생산 시기, 근무 년수, 특정 유해인자 노출 등)에 따라 추가적으로 세분화하여 암 사망율을 분석하였다.²²⁾

Marano 등(2010)도 웨이퍼 가공 공정 근로자를 3단계 노출 특성에 따라 구분했다. 1단계는 웨이퍼 가공 및 칩 생산 근로자 전체, 2단계는 fab과 non-fab으로 분류했다. 3단계에서는 fab과 non-fab 그룹별 근로자를 다시 직무에 따라 분류함으로써 노출 특성을 비슷하게 만들었다. 즉, fab에서는 2개 직무 그룹(운전자/정비작업자, 관리자/감독자) 그리고 non-fab에서는 3개 직무 그룹(사무직, 칩 생산 그룹(back-end workers), 기타)을 묶어 구분했다.²³⁾ Marano 등(2010)은 3단계 직무에 따라 분류된 근로자 그룹별 암 사망률을 일반 인구와 비교하여 유의한 차이를 보이지 않음 보고했다.²⁴⁾ 이 연구에서 공정 정비, 세척 근로자를 공정 운전자와 노출

특성이 같은 그룹으로 묶었는데, 특정 공정 장비, 기계, 부품, 화학물질 등을 교체하고 정비하는 고유한 직무를 가지고 있는 정비 근로자를 운전자와 유사한 노출 특성을 가진 그룹으로 분류하여 분류 오류의 가능성이 있다. 웨이퍼 가공 공정에서 유해인자 노출이 가장 위험한 직무는 공정 정비, 세척 등으로 알려져 있기 때문이다.^{6,8,10)}

Park 등(2010)은 이온 주입 공정에서 발생하는 비소 농도를 고찰하여 정비 작업자의 노출이 가장 높은 것을 발견했다. 이 때 노출되는 농도는 미국국립산업안전보건연구원에서 권고한 천장값(2 ug/m^3)을 훨씬 넘는 7 ug/m^3 으로 추정하였다.²⁵⁾

웨이퍼 가공 공정에는 공정별 정비 근로자 직무 그룹이 있다. 이들은 공정 기계, 부품, 화학물질 등을 정기적 혹은 비정기적으로 교체, 수리, 세척하는 일을 수행한다. 일반적으로 공정 운전자의 유해인자 노출은 정비 작업자에 비해 낮은 것으로 알려져 있다. 최근 웨이퍼 가공 공정에는 운전자의 안전과 보건상의 위험을 차단할 수 있는 근원적인 공학적인 시설이 설치되어 있기 때문이다. 예를 들면, 고압 전류로부터 근로자를 근원적으로 보호하기 위한 인터락(interlock), 이온화방사선 차단을 위한 납 차폐(lead shield), 국소배기장치, 가스 노출 경보장치 등이다. 운전자의 직무는 대부분 이러한 장치들이 정상적으로 기능할 때 이루어지기 때문에 개별적인 유해인자에 대한 노출은 낮다. Boice 등(2010)의 연구에서 60여가지 유해인자에 대해서 12,300개 장/단시간 개인시료(personal sample) 결과 중 단지 2%만이 노출기준을 초과한 것으로 보고했다.²⁴⁾ 정상적인 작업에서 공학적인 시설이 정상으로 가동되는 상황에서의 운전자의 노출은 노출기준 이하가 대부분이라는 것을 의미한다. 그러나 운전자가 배기장치 기능 정지나 손상, 공정 불량, 화학물질 유출 사고, 용기 파손 등으로 짧은 순간동안 높은 수준의 유해인자에 노출되는 경우가 발생할 가능성은 항상 존재한다. 다만 유해인자에 높게 노출되었던 상황, 정도 등을 확인하기가 쉽지 않으며, 비정상적인 작업에서 노출되는 유해인자

와 노출 정도에 대한 보고도 극히 일부만이 알려져 있다.

웨이퍼 가공 공정 별로 운전자와 정비 작업자 그룹이 서로 다른 유해인자에 노출된다. 운전자는 서로 다른 공정에서 서로 다른 직무를 수행하더라도 노출 특성을 확연하게 구분하는 것은 쉽지 않다.^{23,24)} 이것은 공정 운전 직무가 자주 바뀌고, 공정들이 서로 가까이 위치해 있고 순환 환기에 의해 다른 공정의 화학적 유해인자가 이동하기 때문이다. 따라서 과거노출에 따라 근로자를 분류할 때 특별한 노출 특성이 없다면 공정에 상관없이 운전자는 한 그룹으로 묶을 수도 있다.

정비 작업자가 특정 공정만을 정비하였다면 공정 별로 이들을 구분할 필요가 있다. 만약, 정비 작업자를 담당하는 공정에 상관없이 한 그룹으로 묶을 수도 있다. 다만 정비 작업자를 운전자와 구분해서 별도의 노출 그룹으로 구분하는 것은 필요할 것으로 판단된다. Table 4는 웨이퍼 가공 근로자를 생산라인, 부서, 공정, 직무(운전자, 감독자, 정비자 등)에 따라 분류한 사례를 제시한 것이다.

결론적으로 웨이퍼 가공 공정 근로자를 공정과 직무의 유사성에 따라 구분된 주요 그룹은 fab 공정 운전 그룹, 공정 정비 그룹 그리고 기타 다른 직무 그룹이다. 이 그룹들 중 정비 작업자의 노출은 문헌, 경험 등에 근거할 때 유의하게 높기 때문에 별도의 노출 그룹으로 분류해야 한다고 판단된다. 반면, 운전자와 다른 공정 직무 그룹은 연구 목적에 따라 한 그룹으로 묶거나 다른 그룹으로 세분화할 수 있다. 과거노출을 정확히 추정(평가)하기 위해서는 웨이퍼 가공 공정 근로자가 담당했던 직무를 철저히 조사하고 이에 근거해서 연구 목적이 허락하는 범위에서 노출 특성을 최대한 구분하여 근로자를 분류해야 한다. 이것은 노출 분류 오류를 최대한 방지하기 위한 것이다.

3. 웨이퍼 생산 시기(wafer manufacturing eras)

제품 생산 시기에 따라 유해인자 노출 특성과 정도는 변한다는 것은 모든 공정에서 비슷하다. 대부분의 공정

Table 4. An example for assignment of fabrication workers based on department and job title

Worker ID	Plant	Production line	Division	Department	Job
1111	Wafer fab	1	Fab	Etching	Operator
1112	Wafer fab	1	Fab	Etching	Supervisor
1113	Wafer fab	1	Fab	Etching	Maintenance
1114	Wafer fab	1	Fab	Ion implantation	Operator
1115	Wafer fab	1	Fab	Ion implantation	Supervisor
1116	Wafer fab	1	Fab	Ion implantation	Maintenance

에서 시기에 따라, 그리고 공정 기술, 생산 방식, 환기, 법적 조치 등의 변화에 따라 노출 특성이 달라지기 때문이다. 공정, 화학물질 관리, 공학적 시설, 법적/행정적 관리 방법 등이 대부분 개선되기 때문에 일반적으로 유해인자에 대한 과거 노출 정도는 현재보다 높다.

반도체 산업에서도 공정 기술, 자동화, 제품의 변화 등으로 인해 노출은 시간에 따라서 변화하였다.¹⁹⁾ 1965-1999년 동안 미국 IBM 반도체 웨이퍼 가공 사업장에서 생산 공정과 기술에서 많은 변화가 일어났다.²²⁾ 마이크로 칩의 밀도가 18개월마다 2배로 늘어난다는 무어(Gordon Moore)의 법칙에 따라 공정 기술은 매우 빠르게 변화하고 있다.²⁶⁾ 예를 들면, 생산되는 웨이퍼 직경의 크기가 증가(3.25인치 이하, 3.25인치-5인치, 5인치-12인치 등)됨에 따라 수동 작업 빈도는 줄어든다. 즉, 제품, 화학물질, 기계 등을 직접 접촉하는(노출되는) 빈도와 시간이 감소되어 전반적인 노출량은 감소된다. 일반적으로 역학 조사에서는 분류된 특정 생산시기 동안에는 생산 공정, 화학물질과 물리적 유해인자 활용, 작업 방식, 환기 그리고 다른 노출 관리 방법 등이 상대적으로 일정하다고 가정한다.²⁷⁻²⁹⁾

하지만, 공정 기술의 변화는 사용하는 화학물질, 기계, 기술 등이 진화됨에 따라 노출 특성이 달라짐을 의미하므로 동일한 직무를 가진 근로자 그룹이라도 시기에 따라 노출 특성은 달라질 수 있다. 몇몇 역학연구에서 반도체 근로자 그룹을 생산 시기 별로 구분하고 이에 따른 건강 영향을 규명하고자 하였으며, 그 내용을 다음과 같이 정리하였다.

Herrick 등(2005)은 공정과 직무에 따라 분류된 미국 IBM 반도체 근로자 그룹을 다시 3개 시기 별(1956년-1973년, 1974-1983년, 1984년-1999년)로 분류하였다. 시기 별로 구분한 요인은 3가지이다. 첫째, 생산방식의 변화로 클린룸 등급, 웨이퍼 크기, 장치 기하구조(device geometry)에 대한 차이이다. 둘째, 산업 및 환경 관련 법적 요구에 따른 개선으로 가스 라인 밀폐, 가스 검지기 설치, EG류 사용 금지 등의 변화가 일어난 시점이다. 마지막으로 작업 방식에 있어서 화학물질(PR, 가스 등)이나 웨이퍼를 공정에 투입할 때 수동에서 자동으로 변화된 시점이다.

Boice 등(2010)은 미국 반도체 근로자의 암 사망 원인을 규명할 때 근로자 그룹을 시기별로 구분하여 표준화 사망율을 분석했다. 노출 시기는 웨이퍼 가공 기술 변화에 근거해서 초기(1980년대 초반 이전), 중기, 후기로 구분했다. 이러한 분류는 공장 건설이나 업그레이드 시기, 웨이퍼 크기, 회로라인 폭(line width), 일반 환기 형태, 국소배기장치, 공정자동화, 클린룸 카테고리

(class 1, 10, 100, 1000, 10,000) 수준, 개인보호구 착용 정도 등을 근거로 한 것이다. 초기 때 화학물질 노출이 가장 높은 것으로 보고했다.^{23,24)} 또한, 시기에 따라 위험이 큰 유해물질의 사용 금지(혹은 대체)로 인해 특정 유해인자에 대한 노출도 변화가 있었다. 예를 들면 벤젠, 염소화된 탄화수소(chlorinated hydrocarbon), 에틸렌글라이콜류(ethylene glycol; methoxy ethanol, ethoxy ethanol, methoxy ethanol acetate, ethoxy ethanol acetate 등) 등은 제거되거나 유해성이 낮은 물질로 대체되었기 때문이다.^{7,30)} 생산(노출) 시기 별로 반도체 근로자를 그룹 별로 분류하고, 이 그룹 별로 질병 발생률의 차이를 비교할 경우 건강영향과의 연관성 여부를 더 명확하게 평가할 수 있을 것이다.^{22,31)}

4. 특정 유해인자에 대한 노출

웨이퍼 가공 공정 근로자가 과거에 노출된 모든 유해인자를 평가하는 것은 불가능하다. 연구 대상 근로자들을 노출 정보에 따라 분류하는 것도 어렵지만 특정 유해인자에 대한 노출의 차이를 구분하는 것은 더 어렵다. 특정 질병(암, 생식독성 등)을 일으키는 구체적인 원인 인자를 밝히려면 근로자를 특정 유해인자 노출 정도에 따라 분류해야 한다. 특정 유해인자에 대한 노출 여부(yes/no)와 노출 정도를 정성적으로 구분할 수 있는(높음/중간/낮음 또는 높음/낮음) 과거 정보가 있다면 건강상의 영향을 초래한 원인 인자를 규명할 수 있다. 웨이퍼 가공 공정에서 평가할 수 있는 특정 유해인자는 발암인자(비소, 엑스레이, 교대작업, 벤젠 등), 생식 독성물질(EG류, 인간공학적 요인) 등이다.

지금까지 웨이퍼가공 공정 근로자를 대상으로 암 위험 및 사망을 연구한 역학조사는 4건이며, 7건 이상의 논문이 발표되었다(Table 5). 모두 영국과 미국에서만 연구되었으며, 근로자를 분류하는데 직무를 파악하여 활용한 연구는 영국과 미국에서 각각 1건 씩이다.^{22,24)} 나머지는 질병과 직무관련을 명확히 밝힐 수 없는 변수(산업/사업장노출기간 등)를 사용해서 근로자를 분류하였다. 아직까지 반도체 웨이퍼 가공 공정에서 암 사망률이나 발생율을 규명하기 위해서 특정 원인 인자에 대한 과거 노출을 평가한 연구는 없다. Herrick 등(2005)은 반도체 근로자 그룹별로 유해인자 그룹별(유기용제, 금속/산/염기, 비이온화방사선, 이온화방사선, 클린룸) 노출 정도를 3개 수준(환경에서 발생하고 집중적으로 사용, 일부 환경에서 발생하지만 작은 양을 사용, 발생되지 않거나 발생되더라도 매우 작은 양)으로 평가했다. 이러한 평가는 다른 여러 가지 화학물질의 영향으로 특정 발암물질에 의한 영향을 희석시킬 수 있다.

Table 5. A summary of exposure surrogates used to classify wafer fabrication workers in epidemiological study

Author	Study type	Country	Exposure surrogate to classify workers
Sorahan <i>et al.</i> (1985)	SMR/SRR	UK	Industry/Employment period
Sorahan <i>et al.</i> (1992)	SMR/SRR	UK	Industry/Employment period
McElvenny <i>et al.</i> (2003)	SMR/SRR	UK	Industry/employment (latency) period
Beall <i>et al.</i> (2005)	SMR	US	Plant/Employment duration and exposure duration/manufacturing eras
Nicholas and Sorahan (2005)	SMR/SRR	UK	Year of hire/duration of employment/period from 1st employment
Bender <i>et al.</i> (2007)	SIR	US	Plant/Employment duration and exposure duration/manufacturing eras/job title/exposure to chemical(yes vs no)
Boice <i>et al.</i> (2010)	SMR/RR	US	Occupation(fab/non-fab)/duration of employment and job title/occupation and manufacturing eras

Abbreviation

SMR = standard cancer mortality ratio

SRR = standard cancer registration ratio

SIR = standard cancer incidence ratio

RR = relative risk

Table 6. An assessment example of exposure to arsenic in wafer fabrication workers

Operation	Job classification	Exposure classification	Exposure level assessment
Ion Implantation	Operator/supervisor	Yes	Low
Ion Implantation	Supervisor	Yes	Low
	Maintenance worker	Yes	High
Etching	All workers	Yes	Low
Photo	All workers	Yes	Low
Oxidation/epitaxy/metallization	All workers	No	No
Metallization	All workers	No	No

Table 6은 특정 공정, 직무에 속한 근로자의 비소에 대한 노출을 평가한 사례이다. Table 4에서 제시한 부서/직무(DDJ)로 근로자를 조합하여 분류한 다음 위험이 높은 특정 발암물질이나 생식독성 물질 등에 대한 노출을 정성적 혹은 준정성적으로 평가할 수 있다는 것을 나타낸 것이다. 결론적으로 위에서 설명한 부서/공정/직무(DDJ), 특정 유해인자 노출 그리고 생산시기(노출시기)를 각각 혹은 매트릭스로 조합해서 반도체 근로자를 분류하고 이 그룹별로 건강 장애와의 관련을 분석하면 직무 관련성은 물론 원인 인자도 밝힐 수 있을 것이다.

V. 고찰 및 제안

클린 룸으로 알려진 웨이퍼가공 공정에서 일하는(일했던) 근로자들은 수 많은 화학물질과 부산물, 각종 전기 장비에서 방출되는 이온화 및 비이온화 방사선, 매일 서서 일해야 하는 직무 특성, 교대 작업 그리고 생산 실적과 고부가 재료 및 제품 손실 방지 등에 따른

심리적인 스트레스에 동시에 노출되고 있다. 이들 중에는 암 등 치명적인 건강장해를 초래하는 것도 있고 아직 건강장해가 충분히 밝혀지지 않거나 노출기준이 설정되지 않은 것도 매우 많다. 무엇보다 다양한 유해인자의 복합 노출로 인한 건강 영향은 알려진 것이 없다.

웨이퍼 가공 공정은 특정 설비, 캐비닛 안에서 이루어지는 장치 공정이기 때문에 공정과 직무의 특성을 정확히 이해하지 않고서는 유해한 요인과 환경을 구분하는 것이 쉽지 않다. 또한 웨이퍼 가공은 기술 핵심 산업이므로 공정 기술, 사용하는 화학물질 등에 대한 자세한 정보를 구하기가 어렵다. 국내에서는 아직 웨이퍼 가공 근로자의 유해인자에 대한 노출 평가는 물론 공정을 이해할 있는 수 있는 보고서, 논문 등이 거의 없다.

한국산업안전보건공단에서 웨이퍼 가공, 칩 조립공정을 대상으로 수행한 역학 조사의 주요 결론은 언론에 보도된 바 있지만 구체적인 역학 조사 방법, 과거 노출 평가 방법, 유해 인자 노출에 따른 근로자 그룹 분류 방법 등이 아직 공개되지 않았다. 국제적으로 보고된

역학 조사 결과에서도 웨이퍼 가공 근로자의 노출 평가가 완벽하게 이루어진 경우가 드물다. 근로자가 과거에 노출된 유해 인자, 직무 등에 대한 정보를 구하는 것이 어렵기 때문이다. 웨이퍼 가공 나이가는는 반도체 산업 근로자에게 집단 혹은 산발적으로 나타나고 있는 건강상의 장애와 직무 관련은 과학적인 관점에서 규명해야 할 것으로 판단된다. 반도체 근로자에게 발생된 질병에 대한 직무의 영향에 대한 규명은 사업장, 노출 기간, 직무, 유해인자 등에 대한 과거 노출을 조사하고 목적에 맞게 평가해야 한다. 반도체 산업이나 특정 직무의 질병 위험에 대한 영향을 규명하기 위해서는 아래와 같은 핵심 사항을 고려해야 할 것으로 판단된다.

첫째, 직무의 위험에 대한 역학 조사가 필요하다. 이것은 반도체 직무가 미칠 수 있는 암 등 만성 건강 영향을 밝히기 위한 것이다. 과거와 현재의 웨이퍼 가공 산업 혹은 도급 사업장에서 일한(일했던) 가능한 한 많은 근로자를 추적하여 과거 노출과 건강 장애를 정확하게 평가해야 한다. 최소한 생산시기별로 직무에 대한 과거 노출을 평가해야 한다. 직업 역학 연구에서 직면하게 되는 주요 한계점은 과거 노출을 추정할 수 있는 공정, 직무, 일에 대한 정보와 자료가 없거나 있다고 하더라도 충분하지 않다는 사실이다. 회사는 오랜 기간 동안 직무와 유해 인자에 대한 노출 자료를 보관하지 않는 경우가 대부분이다. 또한 적극적으로 이들에 대한 자료를 추정할 수 있도록 공정, 직무, 일에 대한 변화를 자세하게 제공하지 않거나 정상적인 상황만 언급해서 정확한 과거 노출 추정을 어렵게 할 수 있다. 그동안 보고된 웨이퍼 가공 공정 역학 조사에서도 과거 노출 정보가 부족하여 공정과 직무, 생산 시기, 유해인자 노출 정도 차이에 따른 평가를 하지 못했다.^{15-20,31,32)} 건강영향은 사망원인 뿐만 아니라, 암 센터, 병원 자료를 이용하여 암 발생 건수 자료를 수집해야 한다.

둘째, 근로자를 가능한 노출 특성이 비슷한 그룹으로 분류할 때 일어날 수 있는 분류 오류(misclassification)를 최소화해야 한다. 실제로는 근로자가 노출되는 유해인자의 특성이 유의미하게 달라 다른 집단으로 분류되어야 함에도 불구하고 동일 집단으로 취급(분류)할 경우 특정 직무에 의한 건강상의 위험이 희석될 수 있다. 예를 들어 반도체 근로자를 웨이퍼 가공 공정 내부(fab)와 외부(non-fab)로 분류하였을 때, 이와 같은 개략적인 분류에도 유의한 위험이 발견될 수 있지만 특정 공정이나 직무의 관련 여부나 위험은 밝힐 수가 없는 것이다. 위에서 설명한 대로 웨이퍼 가공 근로자를 공정과 직무, 생산 시기, 유해 인자에 대한 노출 특성까지 매트릭스로 평가하여 동일 그룹 내에 속한 근로

자들 간의 유해 인자 노출 차이는 최소화하고(유사하게 하고), 다른 근로자 그룹과의 노출 차이는 최대한으로 하는(서로 다르게) 방법이 이상적이다. 같은 그룹 안에 있는 근로자의 유해 인자 노출 특성은 서로 매우 유사하지만 다른 그룹과는 서로 다르도록 분류하면 노출 분류 오류를 최소화할 수 있다.²⁾ 역학 조사에서 노출 분류 오류에 따른 한계점이 있다면 이를 분명히 언급해야 한다.

셋째, 건강한 근로자 영향(healthy worker effect, 이하 HWE)을 보정해야 한다. HWE는 건강한 근로자가 고용되거나, 또 고용된 사람 중에서도 건강한 사람이 사업장에 남아 있어 이들의 질병 발생 위험이 일반 인구에 비해 유의하게 낮은 결과가 나타나는 영향이다. 일반적으로 질병을 가지고 있는 사람은 고용에서 배제되고, 또 고용된 후에 질병에 걸리면 퇴직하게 되어 특정 연구 시점에는 건강한 근로자만 남게 되므로 이들의 암 등 질병 발생 위험은 건강하지 못한 사람을 포함한 일반 인구보다 낮게 된다. HWE는 주로 건강한 근로자만 고용되고 남게 되는 선택편견(selection bias)에 의한 영향이다. 이 영향을 최소화하는 방법 중의 하나가 비교 그룹으로 동일 혹은 다른 산업의 근로자를 선택하는 것이다.³³⁾ 즉, 동일한 선택편견을 거친 내부(internal) 근로자를 일반 인구 대신에 비교 그룹으로 삼는 것이다. 반도체 산업의 경우, fab과 non-fab, 웨이퍼 가공 직무간(운전자와 정비작업자), 웨이퍼 가공 근로자의 고용 기간 별 그룹 별 상대적인 질병 발생 위험을 비교하는 것이다. 반도체 근로자 역학 조사에서 내부 근로자를 비교 그룹으로 삼은 연구는 1편이다. Boice 등(2010)은 반도체 근로자 그룹 중 fab과 non-fab, 남자와 여자, 비정규직(hourly)과 정규직(salary), 종족(아시아, 흑인, 백인, 히스패닉), 고용기간 그룹 별로 암 사망 상대위험도(relative risk)를 비교하였다.²⁴⁾ 이 연구에서 남자, 비정규직 그리고 흑인에서 암발생위험도가 유의하게 높았다. 유의한 상대위험도를 나타냈다.

우리나라 반도체 산업은 1980년대 중반부터 시작하여 25여 년의 역사를 가지고 있다. 우리나라 경제발전의 핵심산업임을 감안하면 반도체 산업은 향후 일정 기간 동안 지속될 것이다. 앞으로 반도체 근로자의 암 등 만성 건강 장애는 자연적이든 직무로 인한 영향이든 계속해서 발생할 것이다. 이러한 발생이 직무와 연관이 있는지 규명하는 것은 시급한 일이다. 질병의 발생과 직무와의 관련성 나아가서는 원인이 되는 유해인자의 노출을 규명하기 위해서는 본 연구에서 고찰한 반도체 시기에 따라 공정 기술, 관리 기술, 화학물질의 변화, 직무 변화 등에 대한 과거 노출을 반드시

평가해야 한다.

역학 조사를 통해서 반도체 직무와 발생된 질병과의 연관관계를 밝히는 것과는 별도로 향후 반도체 공정 근로자의 건강 위험을 예방하기 위한 노력도 중요하다. 모든 산업이 마찬가지이지만 특히 반도체 산업은 사전 예방원칙(precautionary principle)이 적용되어야 한다. 사용하는 화학물질이 매우 많고 공정과 직무가 빠르게 변하기 때문이다. 유해성이 밝혀지지 않은(노출 기준이 설정되지 않은) 물질 혹은 인자에 대한 노출도 빈번하다. 또한 에너지, 물질, 심리적인 유해 요인에 복합적으로 노출되고 있는 것도 전통적인 방법으로 예방을 하기가 쉽지 않은 이유 중의 하나이다. 반도체 산업은 일부 인자에 대한 정상적인 공정에서의 정량적인 측정과 노출 기준 비교에 의한 노출 평가가 더 이상 효과적이지 않다. 또한 향후 집단 역학 조사를 위해서도 본 연구에서 고찰한 공정과 직무 특성, 노출에 영향을 미칠 수 있는 기술, 공정, 직무의 변화, 위험이 큰 유해 인자에 대한 노출 평가 기록 등이 사업장내에서 체계적으로 이루어져야 한다. 또한 국가는 반도체 근로자의 직무 또는 직업을 표준화하고 이들의 노출과 건강 위험을 감시하는 체계를 만들어야 한다. 이러한 감시에는 반도체 산업의 근로자에게 발생되는 암 등 만성 질병 발생 경향을 국립 암 센터 등 국민건강감시영역과 연계하는 방안이 포함되어야 한다.

참고문헌

- McElvenny, D. M., Darnton, A. J., Hodgson, J. T., Clarke, S. D., Elliott, R. C. and Osman, J. : Investigation of cancer incidence and mortality at a Scottish semiconductor manufacturing facility. *Occupational Medicine*, **53**, 419-430, 2003.
- Herrick, R. F., Stewart, J. H., Blicharz, D., Beall, C., Bender, T., Cheng, H., Matthews, R., Sathiakumar, N. and Delzell, E. : Exposure assessment for retrospective follow-up Studies of semiconductor-and storage device-manufacturing workers. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, **47**, 983-995, 2005.
- LaDou, J. and Bailar, J. C. : Cancer and reproductive risks in the semiconductor industry. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, **13**, 376-385, 2007.
- Watterson, A. and LaDou, J. : Phase Two: Health and safety executive inspection of U.K. semiconductor manufacturers. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, **9**, 392-395, 2003.
- LaDou, J. : Occupational health in the semiconductor industry. In: Labor rights and environmental justice in the global electronics industry: Temple University Press, 31-42, 2006.
- Baldwin, D. G., King, B. W. and Scarpace, L. P. : Ion implanters : chemical and radiation safety. 99-105, 1988.
- Chelton, C., Glowatz, M. and Mosovsky, J. : Chemical hazards in the semiconductor industry. *Education, IEEE Transactions on*, **34**, 269-288, 2002.
- Cox, J. and Rossi, D. : LSI semiconductor manufacturing : John Wiley and Sons. Pub. Ltd., 442-488, 1984.
- Harrison, M. : Semiconductor manufacturing hazards, 472-504, 1992.
- Hawkinson, T. E. and Korpela, D. B. : Chemical hazards in semiconductor operations. Semiconductor safety handbook: safety and health in the semiconductor industry: Noyes Publication, 163-179, 1998.
- Jones, J. H. : Exposure and control assessment of semiconductor manufacturing, 44-53, 1988.
- Stewart, J. and Elkington, K. : Electronics: semiconductor manufacturing. Industrial hygiene aspects of plant operations: John Wiley and Sons Ltd. Pub., 439-463, 1985.
- Ungers, L. J. and Jones, J. H. : Industrial hygiene and control technology assessment of ion implantation operations. *American Industrial Hygiene Association Journal*, **47**, 607-614, 1986.
- Wald, P. H. and Jones, J. R. : Semiconductor manufacturing: an introduction to processes and hazards. *American Journal of Industrial Medicine*, **11**, 203-221, 1987.
- Sorahan, T., Pope, D. and McKiernan, M. : Cancer incidence and cancer mortality in a cohort of semiconductor workers: an update. *British Medical Journal*, **49**, 215-216, 1992.
- Sorahan, T., Pope, D. and McKiernan, M. : Cancer incidence and cancer mortality in a cohort of semiconductor workers: An Update. *British Medical Journal*, **49**, 215-216, 1992.
- Nichols, L. and Sorahan, T. : Cancer incidence and cancer mortality in a cohort of UK semiconductor workers, 1970-2002. *Occupational Medicine*, **55**, 625-630, 2005.
- Clapp, R. W. : Mortality among US employees of a large computer manufacturing company: 1969-2001. *Environmental Health : A Global Access Science Source*, **5**, 30-30, 2006.
- Clapp, R. W. and Hoffman, K. : Cancer mortality in IBM Endicott plant workers, 1969-2001: an update on a NY production plant. *Environmental Health : A Global Access Science Source*, **7**, 13, 2008.
- McElvenny, D. M., Darnton, A. J., Hodgson, J. T., Clarke, S. D., Elliott, R. C. and Osman, J. : Cancer among current and former workers at National Semiconductor (UK) Ltd., Greenock: results of an investigation by the Health and Safety Executive. HSE, 2001.
- Sorahan, T., Waterhouse, J., McKiernan, M. and Aston, R. : Cancer incidence and cancer mortality in a

- cohort of Semiconductor Workers. *British Medical Journal*, **42**, 546-550, 1985.
22. Beall, C., Bender, T. J., 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. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, **47**, 996-1014, 2005.
 23. Marano, D. E., Boice Jr, J. D., Munro, H. M., Chadda, B. K., Williams, M. E., McCarthy, C. M., Kivel, P. F., Blot, W. J. and McLaughlin, J. K. : Exposure Assessment among US workers employed in semiconductor wafer fabrication. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, **52**, 1075-1081, 2010.
 24. Boice Jr, J. D., Marano, D. E., Munro, H. M., Chadda, B. K., Signorello, L. B., Tarone, R. E., Blot, W. J. and McLaughlin, J. K. : Cancer Mortality among US workers employed in semiconductor wafer fabrication. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, **52**, 1082-1097, 2010.
 25. Park, D., Yang, H., Jeong, J., Ha, K., Choi, S., Kim, C., Yoon, C., Park, D. and Paek, D. : A comprehensive review of arsenic levels in the semiconductor manufacturing industry. *Annals of Occupational Hygiene*, 2010.
 26. Mazurek, J. and Ashford, N. A. : Making microchips: policy, globalization, and economic restructuring in the semiconductor industry. The MIT Press, 2003.
 27. Stewart, P. and Herrick, R. : Issues in performing retrospective exposure assessment. *Applied Occupational & Environmental Hygiene*, **6**, 421-427, 1991.
 28. Stewart, P. : Challenges to retrospective exposure assessment. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, **25**, 505-510, 1999.
 29. Smith, T., Stewart, P. and Herrick, R. : Retrospective exposure assessment : Wiley-Blackwell, 308-323, 1995.
 30. Correa, A., Gray, R. H., Cohen, R., Rothman, N., Shah, F., Seacat, H. and Com, M. : Ethylene glycol ethers and risks of spontaneous abortion and subfertility. *American Journal of Epidemiology*, **143**, 707-717, 1996.
 31. Bender, T. J., Beall, C., Cheng, H., Herrick, R. F., Kahn, A. R., Matthews, R., Sathiakumar, N., Schymura, M. J., Stewart, J. H. and Delzell, E. : Cancer incidence among semiconductor and electronic storage device workers. *British Medical Journal*, **64**, 33-36, 2007.
 32. HSE : Cancer among current and former workers at National Semiconductor (UK), Ltd. *Greenock. Results of an Investigation by the Health and Safety Executive*, 2001.
 33. Li, C. Y. and Sung, F. C. : A review of the healthy worker effect in occupational epidemiology. *Occupational Medicine*, **49**, 225-229, 1999.
 34. Wald, P. H. and Jones, J. R. : Semiconductor manufacturing: an introduction to processes and hazards. *American Journal of Industrial Medicine*, **11**, 203-221, 1987.