

반도체 조립공정의 화학물질 노출특성 및 작업환경관리

박승현* · 박해동 · 신인재¹

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원, ¹고용노동부 서울지방고용노동청

Exposure Characteristics for Chemical Substances and Work Environmental Management in the Semiconductor Assembly Process

Seung-Hyun Park* · Hae Dong Park · In Jae Shin¹

Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency

¹Seoul Regional Employment and Labor Office, Ministry of Employment and Labor

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study was to evaluate the characteristics of worker exposure to hazardous chemical substances and propose the direction of work environment management for protecting worker's health in the semiconductor assembly process.

Methods: Four assembly lines at two semiconductor manufacturing companies were selected for this study. We investigated the types of chemicals that were used and generated during the assembly process, and evaluated the workers' exposure levels to hazardous chemicals such as benzene and formaldehyde and the current work environment management in the semiconductor assembly process.

Results: Most of the chemicals used at the assembly process are complex mixtures with high molecular weight such as adhesives and epoxy molding compounds(EMCs). These complex mixtures are stable when they are used at room temperature. However workers can be exposed to volatile organic compounds(VOCs) such as benzene and formaldehyde when they are used at high temperature over 100 °C. The concentration levels of benzene and formaldehyde in chip molding process were higher than other processes. The reason was that by-products were generated during the mold process due to thermal decomposition of EMC and machine cleaner at the process temperature(180 °C).

Conclusions: Most of the employees working at semiconductor assembly process are exposed directly or indirectly to various chemicals. Although the concentration levels are very lower than occupational exposure limits, workers can be exposed to carcinogens such as benzene and formaldehyde. Therefore, workers employed in the semiconductor assembly process should be informed of these exposure characteristics.

Key words : Assembly, chemical substances, semiconductor, work environment

I 서 론

2007년 국내 반도체 제조 사업장에서 백혈병 환자가 발생하여 산업안전보건연구원에서 역학조사를 실시하였으며 그 결과 백혈병 위험도는 일반인구와 차이가 없었으나 비호지킨림프종 표준화암등록비는 생산직 여성근로자에서 유의하게 높았다(Kim et al., 2011; Lee

et al., 2011). 이에 고용노동부에서는 관계전문가 회의를 거쳐 동 연구원에서 백혈병 등 림프조혈기계암에 대한 장기간에 걸친 역학조사 연구와 반도체 사업장 근로자의 건강장해 예방을 위해 반도체 공정별로 유해 요인 노출특성 연구를 수행하도록 하였다(OSHRI, 2012). 본 연구는 반도체 제조공정 중에서 조립(Assembly) 공정에서 노출 가능한 유해요인을 중심으

*Corresponding author: Seung-Hyun Park, Tel: 052-7030-905, E-mail: sh903@kosha.net

Work Environment Research Department, Occupational Safety and Health Research Institute, 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 681-230
Received: June 17, 2014, Revised: September 19, 2014, Accepted: September 22, 2014

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.

로 근로자 노출특성을 파악하였다.

반도체는 다양한 단위 공정을 통해 제조되며 크게 웨이퍼를 가공(Wafer fabrication, fab)하는 공정과 가공된 웨이퍼를 개개의 칩 단위로 조립(Assembly)하는 조립공정으로 구분할 수 있다. 그리고 각 공정은 다시 여러 단계의 복잡한 하부 공정들로 이루어져 있다(ACGIH, 1987; Williams & Baldwin, 1995; Bolmen, 1998; ILO, 1998; Claussen et al., 2001; HSE, 2001; Sato, 2004; OSHA, 2005; Sherer, 2005; OSHRI, 2012). 사업장에서는 웨이퍼 가공공정과 칩 조립공정을 각각 “가공라인”과 “조립라인”으로 구분하고 있다.

조립라인은 가공라인(Fab)에서 가공된 웨이퍼를 날개의 칩으로 자르는 웨이퍼 절단(Wafer saw) 공정, 잘려진 칩을 리드프레임(Lead frame) 등과 같은 회로기판(Substrate)에 붙이는 칩 접착(Die attach) 공정, 칩을 리드와 금선으로 연결하는 금선연결(Wire bond) 공정, 칩을 수지로 감싸주는 몰드(Mold) 공정, 전기 및 열적스트레스를 주면서 테스트하는 공정 등으로 구성되어 있다(Williams & Baldwin, 1995; Sato, 2004; OSHA, 2005; OSHRI, 2012). 조립라인은 가공라인과 같이 많은 종류의 화학물질이 사용되지는 않으나 칩 접착, 몰드공정 등에서 작업자들이 에폭시수지, 경화제, 충전제, 유기용제 등에 노출될 수 있는 것으로 알려져 있다(OSHA, 2005). 그리고 몰드공정에서는 반도체 칩을 외부환경으로부터 보호하기 위해 에폭시 몰딩컴파운드(Epoxy molding compound, EMC)를 이용하여 몰드를 하고 있는데 몰드공정에서 벤젠, 포름알데히드가 발생하는 것이 최근 연구에서 확인되었다(OSHRI, 2012; Park et al, 2012).

II. 연구방법

국내 반도체 제조사업장 2개사 4개의 조립라인을 대상으로 근로자의 화학물질 노출특성을 파악하고 작업환경관리 방안을 연구하였으며 세부적인 연구방법은 다음과 같다.

1. 조립라인에서 노출 가능한 화학물질 파악

1) 조립라인 취급 물질

사업장별로 반도체 조립라인 각 공정별로 취급하는 물질 및 물질별 세부적인 구성성분 및 함량 정보

등을 파악하였다. 이를 위해 각 사업장의 협조를 얻어 공정별 사용물질에 대해 구성성분, 함량 정보 등을 파악했으며, 구성성분이 명확하지 않는 등 추가적인 정보가 필요한 경우는 성분확인을 위해 물질안전보건자료(MSDS)를 추가로 검토하였다.

2) 조립라인에서 2차적으로 발생 가능한 물질

반도체 조립라인에서 화학물질을 가장 많이 사용하는 공정은 몰드공정으로 여러 가지의 에폭시몰딩 컴파운드(EMC)와 금형세정제가 사용되고 있다. 몰드공정의 공정온도는 $180 \pm 5^\circ\text{C}$ 정도이므로 벤젠, 포름알데히드 등의 휘발성물질이 2차적으로 발생될 수 있다(OSHRI, 2012; Park et al., 2012). 따라서 몰드공정에서 2차적으로 발생 가능한 휘발성유기화합물을 관련 문헌을 기초로 정리하였다.

2. 유해물질의 노출농도 평가

반도체 조립라인에서 사용하고 있거나 생산과정에서 2차적으로 발생 가능한 화학물질 가운데 발암성 물질인 벤젠과 포름알데히드를 대상으로 노출농도 평가를 실시하였다. 노출농도 평가는 개인시료채취와 지역시료채취를 병행하였다. 개인시료채취는 화학물질의 노출 가능성이 높은 몰드공정, 칩 접착(Die attach) 공정 등을 대상으로 공정별로 2~4명의 근로자에 대해 실시하였다. 지역시료의 경우는 유해물질이 발생할 수 있는 제품 투입구, 오븐 상단 등 근로자가 노출 가능한 위치에서 평가를 하였고 이와 함께 각 공정별 전반적인 농도 평가가 가능하도록 공정별 장비상단(주로 호흡기 위치에서)에 일정 간격으로 배치하여 측정하였다.

1) 벤젠

반도체 조립라인에서 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)의 노출이 가능한 칩 접착(Die attach) 공정, 몰드(Mold) 공정 등을 대상으로 공기중 벤젠 노출농도를 평가하였다. 칩 접착공정은 접착제와 유기용제를 사용하는 공정이며, $120\sim 180^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서 접착제를 경화시켜주는 과정에서도 VOCs가 발생 가능하다. 몰드공정은 복합물질로 구성된 수지를 $175\sim 185^\circ\text{C}$ 의 온도로 가온하기 때문에 VOCs의 발생이 가능하며, $120\sim 180^\circ\text{C}$ 정도에서 경화(Cure) 작업

이 이루어지므로 VOCs의 발생이 가능하다. 따라서 이들 공정을 포함하여 VOCs가 발생 가능한 공정을 대상으로 공기중 벤젠 노출농도를 평가하였다. 벤젠 농도 평가를 위해 ISO 규격 16017-1을 참고하여 열탈착관을 개인시료채취기(Gilian LFS-113DC, Sensidyne, USA)에 연결하여 0.1 Lpm의 유량으로 6시간 시료채취를 하였으며, 시료는 열탈착시스템(TDS3, Gerstel, Germany)을 통해 탈착한 후 가스크로마토그래피/질량분석기(6890N-5973 Mass Selective Detector, Agilent Technologies, USA)를 이용하여 분석하였다(ISO, 2000). 시료중의 벤젠 함유여부에 대한 확인을 위해 가스크로마토그래피/질량분석기에서 제공하는 정성분석 데이터베이스(Wiley 7n.1)를 이용하여 정성분석(Quality 90% 이상)을 실시하였고 이에 더해 벤젠 표준시약을 이용한 머무름시간 확인을 통해 추가적인 정성분석을 실시한 후 검량선을 작성하여 정량분석을 실시하였다.

2) 포름알데히드

몰드공정에서는 다양한 형태의 수지화합물을 사용하고 있으며 180℃를 전후한 온도로 수지가 가온된다. 노보락수지(포름알데히드-페놀계 수지)의 경우는 포름알데히드(HCHO)가 2차로 발생 가능하며 다른 종류의 수지의 경우도 몰드 또는 몰드경화 과정에서 포름알데히드의 발생이 가능할 것으로 판단된다. 또한 금형세정을 위해 사용되는 물질 중 포름알데히드가 소량 함유되어 있기도 하다. 포름알데히드는 탄소, 수소, 산소로 구성된 가장 기초적인 물질로 반도체 조립라인 각종 공정에서 부산물로 발생될 수 있는 물질이라 볼 수 있다. 따라서 이번 연구에서는 몰

드 공정 등을 중심으로 포름알데히드에 대한 노출수준 평가를 실시하였다. 포름알데히드의 노출수준 평가를 위해 EPA TO-11A 및 NIOSH 2016 방법을 참고하여 2,4-DNPH가 코팅된 실리카겔관을 개인시료채취기(ESCORT ELF, MSA, USA)에 연결하여 1 Lpm의 유량으로 6시간 시료를 채취하였으며, HPLC(Acquity UPLC system, Waters, USA)를 이용하여 시료를 분석하였다(EPA, 1999; NIOSH, 2003).

3. 조립라인 작업환경관리

반도체 조립라인 근로자 건강보호를 위한 작업환경관리 방안을 검토하기 위해 근로자의 작업내용, 작업방법, 환기상태 등에 대한 실태를 파악하였다. 이를 위해 반도체 제조 사업장별로 근로자의 업무내용, 취급물질, 작업방법 등에 대한 기초조사를 요청하였으며, 제출된 기초조사 내용을 참고로 반도체 조립라인을 방문하여 관리자 및 근로자와의 면담, 작업내용에 대한 관찰 등을 통해 작업환경실태를 파악하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 반도체 조립라인 취급물질의 종류

반도체 조립라인은 후면연마(Back grind 또는 back lap) 공정, 웨이퍼 절단(Wafer saw) 공정, 칩 접착(Die attach) 공정, 몰드(Mold) 공정, 솔더볼 부착(Solder ball mount 또는 solder ball attach) 등과 같은 단위 공정들로 구성되어 있다. Table 1은 반도체 조립라인에서 사용하고 있는 물질을 세부 공정별로 분류해 놓은 것이다(OSHRI, 2012).

Table 1. Chemical substances used in semiconductor assembly process

| Unit process | Chemical substances |
|---|--|
| Back grind or back lap | Silica(generally non-crystalline), Ammonia water, Piperazine, Tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH), etc. |
| Wafer saw | Surfactant(Water, Polyethylene-polypropylene glycol, Polyethylene glycol, Hydrogenated tallow glycerides, Wetting agent, Preservative) |
| Die attach | Adhesives(Epoxy resin, Phenolic resin, Acrylate resin, Silver, Silica, Hardener(Phenolic, Amine) Thinner, etc.) |
| Mold | Epoxy molding compound(Silica, Carbon black, Epoxy resin, Phenol resin, Antimony trioxide, etc.) Mold cleaner(Melamine-formaldehyde resin, Microcrystalline cellulose, Silica, wax, etc.) |
| Solder ball mount or solder ball attach | Solder ball(Tin, Silver, Copper), Flux(Polyethylene glycol, Diethyleneglycol monohexylether, Surfactant, etc.) |

※ Source: Occupational Safety and Health Research Institute(OSHRI), 2012

먼저 후면연마 공정은 웨이퍼 가공라인에서 가공된 웨이퍼의 뒷면을 얇게 갈아주는 공정으로 사업장에 따라 Back grind(B/G) 공정 또는 Back lap(B/L) 공정으로 불리운다. 후면연마공정에서 사용하는 물질은 연마제이며, 연마제는 물이 70~90%를 차지하고 기타 산화규소(Fumed silica), 수산화테트라메틸암모늄(Tetramethyl ammonium hydroxide, TMAH) 등이 포함되어 있다. 다음으로 웨이퍼 절단(Wafer saw) 공정은 웨이퍼를 개개의 칩으로 잘라주는 공정으로 절단(Saw) 과정에서 계면활성제가 사용되며 계면활성제는 물, 폴리옥시렌, 폴리에틸렌글리콜, 습식제 등으로 구성되어 있다. 그리고 칩 접착(Die attach) 공정은 웨이퍼 절단(Wafer saw) 공정에서 개개의 칩으로 잘려진 칩을 접착제를 이용하여 회로기판에 접착시키는 공정이다. 칩 접착공정에서 사용되는 접착제 성분에는 에폭시수지, 페놀수지, 은(Ag), 실리카(주로 비결정), 아크릴수지, 경화제(페놀계, 아민계 등), 희석제(아세톤 등의 용제) 등이 사용된다. 몰드공정은 반도체 칩을 에폭시몰딩컴파운드(EMC)로 감싸주는 공정을 말한다. EMC는 에폭시수지, 페놀수지, 삼산화안티몬, 카본블랙, 실리카(보통은 비결정) 등으로 구성되어 있다. 한편 몰드 장비의 세정(금형세정)을 위해서 멜라민 수지가 포함된 화합물이나 왁스 등이 사용되는데 세정작업도 몰드작업과 유사한 공정조건에서 작업이 이루어진다. Table 2는 A사와 B사에서 많이 사용하고 있는 EMC 및 금형세정제를 구성하고 있는 주요성분을 정리해 놓은 것이다(OSHRI, 2012). 사업장에서는 표에서 제시한 EMC 및 금형세정제 이외에 여러 종류의 물질이 사용되고 있으나 각각의 주요 성분은 Table 2에서 제시한 성분들과

유사하며 제품에 따라 각각의 구성 성분의 함량에는 차이가 있었다. 그리고 솔더볼 부착공정은 회로기판에 플럭스를 이용하여 솔더볼(Solder ball)을 붙여주는 공정으로 사업장에 따라서 Solder ball mount 또는 Solder ball attach 공정이라고 한다. Solder ball은 주로 주석(Sn)이 사용되며, 플럭스는 폴리에틸렌글리콜, 디에틸렌글리콜모노헥실에테르 등으로 구성되어 있다. 한편 공정에서 직접적으로 취급하는 화학물질은 없어 Table 1에는 포함하지 않았지만 열적테스트공정(Test during burn-in, TDBI or monitoring burn-in test, MBT)의 경우는 최고 125℃정도에서 테스트를 실시하므로 칩에 몰드된 수지로부터 휘발성 유기화합물이 발생할 수 있다. EMC의 구성 성분인 에폭시수지, 페놀수지는 열경화성 수지로 몰드공정에서 경화된 상태이며 추가로 열을 가할 경우 수지가 다시 녹지는 않는다. 다만 일정 온도 이상에서는 탈 수도 있다.

이상과 같이 반도체 조립라인에서는 연마제, 계면활성제, 접착제, 칩 몰딩용 컴파운드(EMC), 플럭스 등과 같이 제품화된 형태의 복합물질을 주로 사용하고 있었으며 복합물질을 이루는 구성성분에는 에폭시수지, 페놀수지 등과 같은 고분자량 폴리머나 수지 등이 포함되어 있었고, 사업장에 따라서는 아세톤 등의 유기용제를 일부 공정에서 사용하는 경우가 있었다.

2. 반도체 조립라인에서 발생 가능한 2차 생성물질

1) 휘발성유기화합물

몰드공정에서는 반도체 칩을 외부환경으로부터 보호하기 위하여 180℃에서 EMC를 이용하여 몰드 작업을 수행하며 EMC에 함유되어 있는 에폭시수지와

Table 2. Materials and major components used in mold process

| Company | Materials | Major components |
|---------|----------------|--|
| A | EMC-1 | Silica, Carbon Black, Epoxy Resin, Phenol Resin |
| | EMC-2 | Silica Fused, Epoxy Resin, Phenol Resin, Antimony Trioxide, Carbon Black |
| | Mold cleaner-1 | Melamine-formaldehyde resin, Microcrystalline Cellulose, Silica, Zinc stearate, Phthalic anhydride |
| | Mold cleaner-2 | Ethanolamine, Silica, Peroxide, Synthesis Rubber, Titanium Oxide |
| B | EMC-1 | Silica, Carbon Black, Epoxy Resin, Phenolic Resin, Others |
| | EMC-2 | Silica, Epoxy Resin, Phenolic Resin, Antimony Trioxide |
| | Mold cleaner-1 | Melamine-formaldehyde resin, Microcrystalline Cellulose, Silica, Phenolic Resin |
| | Mold cleaner-2 | Synthetic Rubber, Silica Powder, Cleaning agent, Organic Peroxide, Others |

† EMC: Epoxy molding compound.

※ Source: Occupational Safety and Health Research Institute(OSHRI), 2012

페놀수지는 공정온도에서 휘발성성분이 발생할 수 있었고, 금형을 세정하기 위해 사용하는 금형세정제의 경우도 공정온도인 180℃ 정도에서는 휘발성성분이 발생할 수 있었다(OSHRI, 2012; Park et al, 2012). Table 3과 Table 4는 각각 A사와 B사에서 사용하는 EMC와 금형세정제로부터 발생된 휘발성유기화합물 분석결과이다. A사의 경우 Table 3과 같이 실험대상 EMC 5종 모두에서 벤젠, MIBK(Methyl isobutyl ketone) 등의 휘발성유기화합물이 검출되었으며 금형세정제의 경우는 헥사데카노익산 등과 같은 지방산, 페놀, 아세톤 등의 유기화합물이 검출되었다. 그리고 B사의 경우도 EMC에서 벤젠, MIBK 등의 휘발성유기화합물이 검출되었으며 금형세정제에서는 아세톤, 디메틸설폭사이드, 2-(2-에톡시에톡시)에탄올 등의 유기화합물이 검출되었다.

2) 포름알데히드

몰드공정에서 사용되는 EMC와 금형세정제(멜라

민-포름알데히드 수지 등으로 구성)는 구조적으로 포름알데히드를 포함하고 있고 EMC나 금형세정제를 180℃에서 녹여서 반도체 칩을 몰드하거나 금형을 세정하고 있기 때문에 포름알데히드가 발생될 수 있다. 최근 연구결과에 의하면 일부 EMC 및 금형세정제에서 포름알데히드가 발생되는 것을 확인할 수 있었다(OSHRI, 2012; Park et al, 2012).

3. 유해물질 노출농도 평가결과

1) 벤젠

OSHRI(2012)의 연구결과에 의하면 이번 연구대상 4개 조립라인의 공기중 벤젠농도 평균은 0.00030~0.00096 ppm으로 모두 우리나라 노출기준인 1 ppm에 비해 매우 낮은 수준이었다. 이번 연구에서는 부산물이 발생하는 것으로 확인된 몰드공정을 중심으로 공기중 벤젠농도를 평가해 보았으며 평가결과 일부 조립라인 몰드공정의 벤젠농도(Table 5)는 옥외에서 측정된 벤젠농도(0.00031~0.00037 ppm) 보다 높

Table 3. By-products generated from EMC and mold cleaner of company A

| Materials | Detected substances |
|----------------|---|
| EMC-A | Benzene, MIBK, Phenol, MEK, Acetone, Ethanol, Acetaldehyde |
| EMC-B | Benzene, MIBK, Phenol, Ethanol, Isobutane, Acetaldehyde |
| EMC-C | Benzene, MIBK, Toluene, Methyl acetate, Ethanol |
| EMC-D | Benzene, MIBK, Ethyl benzene, Xylene, etc. |
| EMC-E | Benzene, MIBK, Ethyl benzene, etc |
| Mold cleaner-A | Fatty acid(Hexadecanoic acid), Hexadecanoic acid methyl ester, Octadecanoic acid methyl ester |
| Mold cleaner-B | Phenol, Fatty acid(Tetradecanoic acid, Hexadecanoic acid, Octadecanoic acid) |
| Mold cleaner-C | Acetone, 2-Methyl-2-propanol, Butyl ether, 1-Methyl-2-pyrrolidinone |
| Mold cleaner-D | Ethanol, Acetone, 2-Methyl-2-propanol, etc. |

† EMC: Epoxy molding compound, MIBK: Methyl isobutyl ketone, MEK: Methyl ethyl ketone.

※ The detected substances mean components identified(Quality: > 85%) by GC/MS.

Table 4. By-products generated from EMC and mold cleaner of company B

| Materials | Detected substances |
|------------------------|--|
| EMC | Benzene, MIBK, Hexane, Heptane, Phenol, Methyl cyclohexane, etc |
| Dust in dust collector | Benzene, Dimethyl sulfoxide, Dimethyl sulfone, 2-(2-Ethoxyethoxy) ethanol, 1-Methyl-2-pyrrolidinone |
| Mold cleaner-A | Acetone, 2-Methyl-2-propanol, 2-Methoxy-2-methyl propane, Dimethyl sulfoxide, 2-(2-Ethoxyethoxy) ethanol, Propanoic acid butyl ester, 1-Methyl-2-pyrrolidinone |
| Mold cleaner-B | Acetone, 2-Methyl-2-propanol, 2-Methoxy-2-methyl propane, MEK, Octane, Dimethyl sulfoxide, 2-(2-Ethoxyethoxy) ethanol, 1-Methyl-2-pyrrolidinone |

† EMC: Epoxy molding compound, MIBK: Methyl isobutyl ketone, MEK: Methyl ethyl ketone.

※ The detected substances mean components identified(Quality: > 85%) by GC/MS.

았다($p<0.05$).

2) 포름알데히드

연구대상 4개 조립라인의 공기중 포름알데히드 농도 평균은 0.004~0.008 ppm으로 모두 우리나라 노출기준인 0.5 ppm보다 매우 낮은 수준이었다(OSHRI, 2012). 이번 연구에서는 포름알데히드가 부산물로 발생할 수 있는 몰드공정을 중심으로 공기중 포름알데히드 농도를 평가해 보았으며 평가결과 일부 조립라인 몰드공정의 포름알데히드 농도(Table 6)는 옥외에서 측정된 포름알데히드 농도(0.002~0.005 ppm) 보다 높았다($p<0.05$).

4. 반도체 조립라인 작업환경관리

1) 후면연마(Back grind 또는 back lap) 공정

후면연마공정에서는 웨이퍼의 뒷면을 얇게 갈아주는 과정에서 연마제의 비산으로 화학물질에 노출 가능하며, 부품교체, 세척 등을 위한 PM(유지보수) 작업시 장비내에 잔류하고 있는 연마제에 접촉이 가능하고, 배관이나 연결부위 점검 및 연마제의 보충과정에서도 화학물질에 노출이 가능하다. 현재 사업장별 조립라인에 설치된 후면연마 장비는 밀폐형 구조이고 국소배기장치가 설치되어 있어 장비가 가동되는 과정에서 근로자에게 화학물질이 노출될 가능성은

낮다. 그러나 후면연마장비의 문을 개방하고 작업을 하는 일이 없도록 관리할 필요가 있다. PM 작업을 수행할 경우에는 장비 내에 잔류물질을 배출하고, 장비내에서 작업을 하는 경우에는 개인보호장비를 착용하고 작업을 하여야 한다. 연마공정에서는 수산화테트라메틸암모늄(TMAH)과 같은 강염기성 물질이 사용되고 있으므로 이에 적합한 호흡용보호구, 보호장갑, 보호의, 보호앞치마 등을 착용하고 작업을 하여야 한다. 최근 국내외 전자산업에서 배관이나 배관 연결부위에 대한 점검작업 등을 수행하는 과정에서 TMAH 누출사고로 인한 급성중독 피해 사례가 보고되고 있다(Wu et al., 2008; Lin et al., 2010; Lee et al., 2011; Park et al., 2013). 따라서 TMAH를 취급하는 경우에는 각별한 주의가 요구된다.

2) 웨이퍼 절단(Wafer saw) 공정

웨이퍼 절단공정에서는 웨이퍼를 자르는 과정에서 계면활성제의 비산으로 인해 에틸렌글리콜 등에 노출 가능하며, 부품교체, 세척 등을 위한 PM 작업시 장비내에 잔류하고 있는 물질에 노출이 가능하다. 현재 사업장별 조립라인에 설치된 웨이퍼 절단설비는 밀폐형 구조이고 국소배기장치가 설치되어 있어 장비가 가동되는 과정에서 근로자에게 화학물질이 노출될 가능성은 낮다. 그러나 장비 문을 개방하고 작

Table 5. Benzene concentration in mold process

| Company | Samples | Concentration, ppm | | |
|----------|---------|--------------------|---------|-----------------|
| | | AM | SD | Range |
| A-1 line | 11 | 0.00030 | 0.00007 | 0.00020~0.00041 |
| A-2 line | 4 | 0.00040 | 0.00011 | 0.00024~0.00050 |
| B-1 line | 14 | 0.00225 | 0.00245 | 0.00052~0.00990 |
| B-2 line | 18 | 0.00105 | 0.00055 | 0.00038~0.00256 |

* Occupational Exposure Limit-Time Weighted Average: 1 ppm.

Table 6. Formaldehyde concentration in mold process

| Company | Samples | Concentration, ppm | | |
|----------|---------|--------------------|--------|-------------|
| | | AM | SD | Range |
| A-1 line | 7 | 0.008 | 0.002 | 0.006~0.013 |
| A-2 line | 4 | 0.004 | 0.0002 | 0.003~0.004 |
| B-1 line | 8 | 0.009 | 0.001 | 0.007~0.011 |
| B-2 line | 6 | 0.009 | 0.003 | 0.007~0.015 |

* Occupational Exposure Limit-Time Weighted Average: 0.5 ppm.

업을 하는 일이 없도록 관리하여야 할 것이다.

3) 칩 접착(Die attach) 공정

칩 접착공정에서는 접착제에 포함되어 있는 휘발성 유기화합물에 노출될 수 있다. 특히 스텐실 기법으로 접착제를 도포하는 경우는 스텐실을 세척하는 과정에서 세척용매에 노출될 수 있다. 접착제 도포 후에는 보통 175℃에서 1시간정도 경화(Cure)의 과정을 거치는데 경화과정에서 접착제에 함유되어 있던 유기화합물이 휘발될 수 있다. 특히 경화작업 후 배기 시간이 충분하지 않을 경우에는 제품을 꺼내기 위해 오븐의 문을 여는 과정에서 휘발성유기화합물에 노출될 수 있다. 따라서 접착제에 유기용제가 포함되어 있거나, 아세톤과 같은 유기용제를 이용하여 세척작업을 수행하는 경우에는 칩 접착장비나 접착제 도포 장비에 국소배기장치를 설치하여 유기용제의 노출을 최소화 할 필요가 있다. 그리고 경화오븐(Cure oven)에 국소배기장치를 설치하여 경화과정이나 오븐을 열 때 휘발성물질의 노출을 최소화할 필요가 있다.

4) 몰드(Mold) 공정

몰드공정에서는 EMC 및 금형세정제가 가온되거나 녹는 과정에서 부산물이 발생할 수 있다. 몰드공정에서는 EMC를 반도체 칩에 코팅하는 과정에서 EMC의 구성성분인 카본블랙, 실리카, 삼산화안티몬 등이 발생할 수 있다. 그리고 EMC를 180℃ 정도로 가열하여 칩에 코팅하는 과정에서 열분해 산물로 벤젠, 포름알데히드 등이 발생할 수 있다(Park et al., 2012). 또한 경화과정에서 휘발성 유기화합물이 발생할 수 있으며, 경화작업 후 오븐의 문을 열 때 이러한 휘발성 유기화합물에 노출될 수 있다. 그리고 금형세정제를 180℃ 정도로 가열하여 금형(몰드장비)을 세정하는 과정에서 열분해 산물인 포름알데히드 등 휘발성 유기화합물이 발생할 수 있다. 따라서 몰드장비에는 국소배기장치가 설치되어야 하며 항상 정상적으로 가동되는 상태에서 작업하여야 한다. 현재 몰드장비에는 국소배기장치가 설치되어 있으나 몰드장비의 오작동이나 제품 불량 등이 발생할 경우 장비의 문을 열고 수정작업을 하는 경우가 있어 휘발성유기화합물 등에 노출되는 경우가 있다. 그러므로 오작동이나 불량이 발생한 경우에는 바로 장비문

을 열고 수정작업을 하기 보다는 장비내에 잔류하는 유해물질이 국소배기장치를 통해 배출되도록 일정 시간이 지난 후 수정작업을 수행하도록 관리할 필요가 있다. 그리고 경화가 끝난 후 오븐에서 냉각과 배기를 충분히 한 후 제품을 꺼내도록 하고, 오븐의 문을 열 때 오븐 내 남아있을 수 있는 유해가스의 확산이나 노출을 방지하기 위해 오븐의 문과 가까이 국소배기장치를 설치하는 것이 바람직하다.

5) 솔더볼 부착(Solder ball mount, solder ball attach) 공정

솔더볼 부착공정에서는 솔더볼 부착과정에서 주석, 구리, 플럭스 성분 등에 노출될 수 있고, 솔더볼 부착 후 280℃ 정도까지 가열하여 경화(Cure)하는 과정에서 플럭스 성분으로부터 휘발성물질이 발생될 수 있다. 솔더볼 부착공정은 기관에 솔더볼을 올려주는 부분, 경화하는 부분, 세척하는 부분 등이 연속되어 진행되는 공정으로 각각의 부분은 밀폐형 구조의 장비에서 작업이 이루어지나 제품이 이동하는 부분은 개방되어 있으므로 이러한 부분을 통해 휘발성유기화합물 등이 발생될 수 있다. 그러므로 휘발성유기화합물 등 유해물질에 노출되지 않도록 하기 위해서는 국소배기장치가 정상적으로 작동되는 상태에서 작업을 수행하여야 한다.

6) 열적테스트(Test during burn-in, TDBI or monitoring burn-in test, MBT) 공정

고온의 테스트 과정에서 휘발성 유기화합물이나 열적 부산물이 발생할 수 있으므로 모든 열적테스트 설비에는 국소배기장치가 갖추어져 있어야 한다. 그리고 테스트 설비는 밀폐구조로 이루어져서 테스트 동안에는 외부로 휘발성물질이 발생되지 않도록 하고, 테스트가 종료된 이후에도 챔버내에서 발생된 휘발성 유기물질 등이 충분히 배기된 후에 장비문이 열리도록 하여야 할 것이다.

IV. 결 론

반도체 조립라인에서는 칩 접착, 몰드공정 등에서 접착제, 칩 몰딩용 수지 등 제품화된 형태의 복합물질을 주로 사용하고 있었고, 복합물질을 이루는 구성성분에는 고분자량 수지, 폴리머 등이 많이 포

함되어 있었다. 그리고 고온에서 에폭시몰딩컴파운드(EMC)와 금형세정제(Mold cleaner)를 취급하는 몰드공정에서는 벤젠, 포름알데히드를 비롯하여 여러 종류의 휘발성유기화합물이 부산물로 발생할 수 있었다.

벤젠과 포름알데히드가 부산물로 발생할 수 있는 몰드공정을 중심으로 벤젠과 포름알데히드의 농도를 평가해 본 결과 벤젠의 농도는 0.0002~0.0099 ppm으로 우리나라 노출기준인 1 ppm의 1/100 이하의 수준이었고, 포름알데히드의 농도는 0.003~0.015 ppm으로 우리나라 노출기준인 0.5 ppm의 3/100 이하의 수준이었다.

결론적으로 반도체 조립라인은 칩 접착, 몰드공정 등 여러 공정에서 수십 여종의 물질을 취급하고 있었고 생산과정에서도 열분해 물질 등이 2차적으로 발생되고 있었으나 공기 중 농도는 노출기준에 비해 매우 낮은 수준이었다. 이는 조립라인에서 사용하는 물질이 주로 고분자량의 폴리머나 수지 등인 관계로 취급 물질에 의한 직접적인 영향이 적고 열분해 물질이 발생하더라도 대부분 생산장비 내에서 발생하고 국소배기장치를 통해 배출되고 있어 공기 중 농도가 낮았을 것으로 판단된다. 다만 열분해 물질중에는 벤젠과 포름알데히드 등의 발암물질이 포함되어 있으므로 불량이 발생되거나 단위 작업이 종료되어 작업자가 장비커버나 문을 열 때에는 일부 발암물질에 노출될 수 있음을 알아야 할 것이다. 따라서 반도체 제조 사업장에서는 이러한 유해물질 노출특성을 이해하고 작업환경관리를 하여야 할 것이다.

References

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Hazard assessment and control technology in semiconductor manufacturing. Lewis publishers, Inc. Ohio; 1987
- Bolmen RA, editor. Semiconductor safety handbook: Safety and health in the semiconductor industry. New Jersey: Westwood; 1998
- Claussen W, Lorenz B, Penner K, Vogt M, Sperlich HP, inventors; Siemens Aktiengesellschaft, assignee. Method for fabricating a semiconductor structure. United States Patent US 6245640. 2001 Jun 12
- Environmental Protection Agency(EPA). Compendium Method TO-11A: Determination of formaldehyde in ambient air using adsorbent cartridge followed by high performance liquid chromatography(HPLC). EPA; 1999
- Health and Safety Executive(HSE). Cancer among current and former workers at national semiconductor(UK) Ltd, Creenock: Results of an investigation by the Health and Safety Executive. HSE; 2001
- International Labour Organization(ILO). Encyclopedia of occupational health and safety. 4th ed. Geneva, ILO; 1998
- International Standardization Organization(ISO). Indoor, ambient and workplace air - Sampling and analysis of volatile organic compounds by sorbent tube/thermal desorption/capillary gas chromatography - Part 1: Pumped sampling. ISO 16017-1, 2000
- Kim EA, Lee HE, Ryu HW, Park SH, Kang SK. Cases series of malignant lymphohematopoietic disorder in Korean semiconductor industry. Saf Health Work 2011;2:122-34
- Lee CH, Wang CL, Lin HF, Chai CY, Hong MY, Ho CK. Toxicity of tetramethylammonium hydroxide: Review of two fatal cases of dermal exposure and development of an animal model. Toxicol Ind Health 2011;27(6):497-503
- Lin CC, Yang CC, Ger J, Deng JF, Hung DZ. Tetramethylammonium hydroxide poisoning. Clin Toxicol 2010;48:213-7
- Lee HE, Kim EA, Park JS, Kang SK. Cancer mortality and incidence in Korean semiconductor workers. Saf Health Work 2011;2:135-47
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH manual of analytical methods (2003): No 2016 [cited 2014 May 26]; Available at <http://www.cdc.gov/niosh>
- Occupational Safety and Health Administration(OSHA). Semiconductors 2005. [cited 2014 May 26]; Available at <http://www.osha.gov/SLTC/semiconductors/index.html>
- Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI). Characteristics of worker's exposure to hazardous agents in semiconductor manufacturing industry. OSHRI 2012-96, 2012
- Park SH, Shin JA, Park HD. Exposure possibility to by-products during the processes of semiconductor manufacture. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2012;22(1):52-59
- Park SH, Park JS, You KH, Shin HC, Kim HO. Tetramethylammonium hydroxide poisoning during a pallet cleaning demonstration. J Occup Health 2013;55:120-124

Sato A. inventor; Seiko Epson Corporation, assignee. Method of manufacturing semiconductor device, molding device for semiconductor device, and semiconductor device. United States Patent US 6821822. 2004 Nov 23
Sherer JM. Semiconductor industry: Wafer fab exhaust management. Florida: Boca Raton; 2005

Williams ME and Baldwin DG. Semiconductor industrial hygiene handbook: Monitoring, ventilation, equipment and ergonomics. New Jersey: Park Ridge; 1995
Wu CL, Su SB, Chen JL, Lin HJ, Guo HR. Mortality from dermal exposure to tetramethylammonium hydroxide. J Occup health 2008;50:99-102