[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 33, No. 5, 2013
ISSN 1598-6411
http://dx.doi.org/10.7836/kses.2013.33.5.024

결정질 실리콘 기반 태양광산업에서의 근로자노출 가능 유해인자

Workers' Possible Exposure Hazards in Solar Energy Industries

장재길*† · 박현희**
Jae-Kil Jang*† , Hyunhee Park**

(Summit date : 2013. 7. 10., judgement date : 2013. 8. 13., publication decide date : 2013. 10. 15)

Abstract : Renewable energy industries, including sola cell plants, has been ever increasing ones for reducing fossil fuel consumption and strengthening national energy policy. In this paper we tried to identify occupational health hazards in solar cell-related industries operated in Korea. Poly silicon, silicon ingot and wafer, solar cell and module are major processes for producing solar cells. Poly silicon operations may cause hazards to workers from metal silicon, silanes, silicon, hydro fluoric acid and nitric acid. Solar cells could not be constructed without using metals such as aluminum and silver, acids such as hydrofluoric acid and nitric acid, bases such as sodium hydroxide and potassium hydroxide, and solvent and phosphorus chloride oxide. Workers in module assembly process may exposed to isopropanol, flux, solders that contain lead, tin and/or copper. To prevent occupational exposure to these hazards, it is essential to identify the hazards in each process and educate workers in industries with proper engineering and administrative control measures.

Key Words : 태양광 산업(Solar energy industries), 태양전지(Solar cell), 직업적 유해인자(Occupational hazards), 실리콘(Silicon)

1. 서 론

전 세계적으로 환경보호 및 에너지 자립과 미래성장 동력 창출을 목적으로 신재생에너지에 대한 투자가 빠르게 증가하고 있으며 그 중심에 태양광산업이 존재한다. 국내에서는 약 20조원을 투자하여 태양광 산업을 핵심 산업으로 성장시키려는 야심찬 계획을 가지고 있다[1)-3)]. 최근 급성장한 반도체산업의 경우 현재의 태양광산업과 같이 국가발전의 선도적

*† 장재길(교신저자) : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 직업건강연구실
E-mail : cihjj@kosha.net, Tel : 032-510-0801
*박현희 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 직업건강연구실

*† Jae-Kil Jang(corresponding author) : Center for Occupational Health Research, Occupational Safety and Health Research Institute, Occupational Safety and Health Agency(KOSHA).
E-mail : cihjj@kosha.net, Tel : 032-510-0801
*Hyunhee Park : Center for Occupational Health Research, Occupational Safety and Health Research Institute, Occupational Safety and Health Agency(KOSHA).

입지를 구축해 왔으나 생산현장의 여러 유해인자에 대한 정보가 충분히 제공되지 못해 근로자가 직업성질환에 시달리는 사례가 있었다[4].

따라서 본 연구에서는 국내 태양관산업의 작업공정을 중심으로 근로자가 생산 현장에서 노출될 수 있는 유해인자를 정리함으로써, 해당 인자에 의한 직업성질환 예방을 위한 정보를 관련 산업 종사자와 공유하고자 하였다.

2. 국내 태양광산업의 주요 공정[5-7]

태양광 발전은 태양빛을 전기에너지로 변환시키는 광전효과를 기본원리로 한다. 이를 위해 전 세계적으로 고순도의 실리콘(Silicon : Si)을 원료로 하는 산업이 발달되었다. 태양광전지를 생산하기 위해서는 실리콘을 메탈실리콘으로 전환시킨 후, 이를 고순도의 폴리실리콘으로 정제하는 과정을 거친다. 국내에는 메탈실리콘(MG-Si) 생산 산업체가 없는 것으로 알려져 있다.

폴리실리콘은 다시 다결정 혹은 단결정의 잉곳(Ingot)으로 제조된 후 웨이퍼로 가공된다. 실리콘웨이퍼 위에 불순물 확산, 표면반사방지막 형성, 표면과 바닥 이면전극의 알루미늄 및 은페이스트 인쇄와 납땜코팅 형성 등 과정 등을 거치면 비로소 태양전지가 완성된다.

2.1 폴리실리콘 공정

폴리크리스타라인 실리콘(poly-crystalline silicon)이라고도 하며, 고순도의 다결정 화합물이다. 태양전지 소재의 90% 이상은 실리콘이며 반도체급은 9~12N이상, 태양전지급은 6N이상의 고순도가 요구된다. 금속실리콘을 가용로에서 염산과 함께 300℃에서 반응시켜 순도를 높인 삼염화실란($SiHCl_3$)을 생성시킨다. 이를 수소와 함께 1,100℃의 온도로 유지시켜 고순도의 다결정 실리콘을 만드는 데 이를 지멘스(Siemens) 방식이라 하며 폴리실리콘 생산 90% 정도에 적용되고 있다. FBR(fluidized bed reactor) 방식과 MG-SoG(Solar grade metallurgical silicon) 방식 및 VLD(vapor-to-liquid deposition) 방식의 공정도 있다.

2.2 잉곳/웨이퍼 공정

잉곳의 제조방식은 실리콘의 단결정, 다결정에 따라 구분된다. 단결정은 고순도 다결정 실리콘을 1,500℃ 정도에서 녹인 뒤 필요한 불순물을 첨가하고, 핵을 넣어서 천천히 끌어올리면서 만든다(Czochralski법, Cz). 완성된 기둥모양의 실리콘 잉곳을 와이어 톱으로 디스크 형태로 자르면 웨이퍼(Wafer)가 된다. 단결정 실리콘 제조는 직경 12 인치 정도의 대면적 제조가 가능한 Cz법이 일반적으로 적용되고 있다.

다결정 실리콘은 약 1,400℃에서 녹인 다결정 실리콘을 굳힌 뒤 잘라서 만든다. 실리콘 용액을 평판형 형틀 또는 다각형 판 형틀 사이의 틈으로 천천히 뽑아내며 절단하고, 불순물을 첨가하여 제조하는 주조방식과 녹인 실리콘을 2개의 실로 표면장력을 이용하여 끌어올려 얇은 실리콘 판을 만드는 리본방식이 있다. 얇게 형성된 판을 알맞게 절단하면 되므로 단결정 실리콘 웨이퍼 제조공정보다 재료의 절단손실이 적다.

2.3 태양전지(셀) 공정

태양전지의 최소단위를 셀이라고 하며 보통 셀 1개로부터 나오는 전압은 약 0.5~0.6V로 매우 작으므로 여러 개를 직렬로 연결하여 수 V에서 수백 V이상의 전압을 얻도록 패널형태로 제작한 것을 모듈(module)이라고 한다, 모듈을 여러 개 이어서 설치한 것을 어레이(array)라고 한다.

실리콘 웨이퍼 위에 불순물 확산, 표면반사방지막 형성, 알루미늄과 은 페이스트를

이용한 표면 및 바닥 이면전극의 형성과 납땜코팅 과정을 거쳐 태양전지가 완성된다.

2.4 모듈 공정

모듈은 여러 개의 셀을 모은 것으로 외부환경으로부터 태양전지를 보호하기 위해 유리기판, 충진재 (Ethylene Vinyl Acetate: EVA), 표면재 (backsheet) 등을 진공상태에서 압축시켜 내구성이 좋고 설치가 편리하게 제작한다.

3. 공정별 유해요인

국내 태양광 산업은 폴리실리콘 생산, 잉곳 및 웨이퍼 제조, 그리고 셀을 이용하여 태양전지를 완성하는 산업체로 구성되어 있다. 각 산업체 별로 1~2곳을 선정하고 현장을 방문하여 공정별 유해인자를 확인하고 정리하였다. 조사대상 사업장의 일반 현황은 Table 1과 같다.

Table 1. Subject sites for occupational hazards identification

Class	Site	District
Polysilicon	○○○ Silicon	Jeonra
Ingot/wafer	○○○ Chem.	Daejeon/Chungcheong
	△△△ Chem.	Daejeon/Chungcheong
Module/Cell	○○○ Industry	Daejeon/Chungcheong
	△△△ Industry	Daejeon/Chungcheong

3.1 폴리실리콘 공정[4)]

메탈실리콘을 고순도의 염소(HCl)와 반응시켜서 염화실란(chlorosilane: SiH_4)으로 만든 다음 이를 증류시켜 기체상태의 삼염화실란(trichlorosilane: TCS)을 얻는다. 수소와 함께 ∩자 모양을 가진 고온의 실리콘 막대와 원료가스인 삼염화실란을 반응시켜 폴리실리콘을 얻는다. 폴리실리콘 공정은 정유공장과 같은 대규모의 장치산업으로 구성되며 옥외에 설비가 구축되어 있다. 이 공정에서 근로자가 노출될 수 있는 유해인자는 Table 2에 제시하였다.

Table 2. Poly-silicon production process and hazards

Process	Exposure hazards
Imput	Metal Silicon
Chemical reaction with HCl	(HCl $SiCl_4$ (STC) $SiCl_3$ (DCS) SiH_4 (Mono silane) $SiHCl_3$ (TCS)
Chemical deposition	-
Cutting/Crushing	Silicon
Cleaning	Acid mist (HF, HNO_3 etc.)
Shipping	Silicon

3.2 잉곳 및 웨이퍼[4)]

(1) 단결정 실리콘

Cz공정은 약 1,420℃의 석영도가니에 폴리실리콘을 불순물(붕소 또는 인)과 함께 넣어 진공상에서 종자 결정을 담그고 용융액으로부터 위쪽으로 끌어올린다. 이 과정 동안 결정은 원통모양의 단결정 잉곳으로 성장한다. 잉곳을 얇게 절단한 것이 단결정실리콘 웨이퍼이다. 원통모양을 준원형 또는 정사각형 막대 형태로 자른 후 쇠줄톱 또는 다이아몬드 등으로 슬라이스로 자르므로 웨이퍼들에 잔여물질이 남는데 이 잔여물질과 톱질자국을 없애기 위해 계면활성제, 알코올 등을 이용하여 화학적으로 습식 세정해야 한다. 이 공정에서의 근로자 노출 가능성 유해인자는 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Monocrystalline silicon wafer production process and hazards

Process	Exposure hazards
Stacking	Silicon
Melting	Silicon
Body growing	Silicon
Cutting	Silicon

(2) 다결정 실리콘[4)]

다결정질 실리콘 웨이퍼 제조는 실리콘 원석을 도가니에 넣고 고온에서 가열시켜 녹인 후, 정제하여 일정한 틀에 부어 응고시키는 방법으로 잉곳을 만든다. 주형과 동일한 형태의 다결정 실리콘 덩어리를 얻을 수 있다. 이 실리콘 덩어리를 단결정 실리콘과 동일한 절단 작업을 거쳐서 일정 두께의 웨이퍼를 제조한다. 이 공정에서 근로자의 노출우려 물질은 Table 2와 동일하다.

3.3 셀(태양전지)[4)]

(1) 표면조직화

단결정 실리콘 웨이퍼의 표면조직화는 KOH나 NaOH 같은 염기성 용액으로 표면을 조직화를 하며 이 공정을 거친 단결정 웨이퍼의 반사율은 12% 이하까지 줄일 수 있다. 다결정 실리콘은 결정방향이 일정하지 않으므로 산 용액을 이용한 등방성 식각(Isotropic etching)이 효과적이다. 그러나 가격이 높고 발열반응이므로 냉각과 식각 과정에서 발생하는 독성증기를 배기시키기 위한 설비가 필요하다. 공정 후 반사도가 25%정도 수준까지 이르지 못하는 약점 때문에 최근에는 ICP(inductively coupled plasma)를 이용한 RIE(reactive ion etching)이라는 건식 식각 방법이 쓰이고 있다.

(2) 확산과 도핑

전기 생산을 위한 태양전지의 전자 이동은 pn접합(P-N junction)부분에서 이루어진다. 이를 위해 웨이퍼 표면에 인(P)이나 불소 등 불순물로 pn접합을 형성시켜 주어야 한다. 전계를 이용하여 고속으로 가속된 불순물을 이온상태로 주입하게 되는 이온주입 공정을 도핑이라고 한다. $POCl_3$는 가장 보편적으로 사용되는 도핑 소스이다. 선증착 과정은 로 안으로 운반된 고온의 $POCl_3$와 O_2가 서로 반응하여 웨이퍼 표면에 P_2O_5 층을 형성하고, 850℃ 이상의 온도에서 열처리를 하면 P_2O_5 층의 인(P)이 Si 속으로 확산되어 n층을 형성한다.

(3) PSG제거

도핑 후에는 웨이퍼 전체 면에 n층이 형성되는 동시에 실리콘 웨이퍼 내부에 포함되어 있는 불순물도 석출되므로 웨이퍼 표면에 남아 있는 부산물 PSG(phosphorus silicate glass)층을 제거해야 한다. 도핑 과정이 끝난 후 5~10%로 희석한 불산(HF) 용액으로 처리하여 실리콘 표면의 손상 없이 PSG층을 제거할 수 있다.

(4) 반사방지막 코팅

태양전지에 입사하는 빛의 반사손실을 줄이기 위해 형성시키는 막이다. 빛의 굴절율과 두께를 조절하여 표면 반사를 최소화 한다. 최적의 태양광 흡수를 고려하여 실리콘 화합물 등의 반사방지막을 적용하고 있으며 태양전지의 표면은 진한 푸른색(dark blue)을 띠게 된다.

(5) 금속 인쇄

금속전극 형성은 웨이퍼 양면에 전극을 형성시켜 주기위해 스크린 프린트 방식으로 금속 분말을 인쇄한 후 건조 및 소성 공정을 통해 전극을 형성하는 공정이 현재 가장 많이 사용된다.

(6) 금속 건조 및 소성

금속전극 공정은 금속전극 인쇄를 위한 스크린 프린팅 공정과 금속 페이스트에 섞여있

는 솔벤트를 제거하는 드라이 공정, 그리고 페이스트 속에 남아있는 각종 유기물을 날려 버리고 ARC 막을 뚫고 금속 전극이 n-층과 접촉을 이루게 하기 위한 firing 공정으로 나뉜다. 이 중 가장 태양전지 효율에 영향을 미치는 공정은 바로 firing 공정이다.

(7) 측면 분리

도핑공정에서 pn접합을 수행하면 전면, 측면, 후면에 모두 불순물이 확산된다. 금속 전극이 미도포된 부분에서 누설전류가 발생하기 때문에 pn 접합 분리가 필요하다.

이상의 태양광 셀 제조공정의 근로자가 노출될 가능성이 있는 유해인자는 Table 4에 요약하여 정리였다.

Table 4. Solar cell production process and hazards

Process	Exposure hazards
Etching/Texturing	Acid (HF, HNO_3 etc.), Base (NaOH, $Ca(OH)_2$ etc.)
Diffusion	$POCl_3$
Oxidized film Removal	HF
Reflection membrane coating	SiH_4 (Mono silane)
Electrode making	Ag, Al, Organic vapors
Plasticity	Organic vapors
Insulation	-

3.4 모듈[4)]

모듈은 셀을 직렬로 연결하여 원하는 출력을 낼 수 있도록 하는 것이며, 장기간 자연환경 및 외부충격으로부터 전지를 보호하기 위해 밀봉과 합착이 이루어진다.

리본(ribbon)은 전지표면에 있는 전극을 납땜으로 연결하기 위해서 사용하는 얇은 금속(주석, 은 또는 구리 성분) 띠로 이를 연결하여 스트링(string)을 만든다. 태양전지의 전면 버스바와 후면 버스바에 배선 재료인 tab를 달고 전후면에 리본으로 교차 연결하여 태양전지를 9장 또는 12장씩 한줄로 연결한다. 스트링을 차례로 쌓은 후 라미네이션하여 프레임 작업을 거친 후 모듈작업을 완성한다. 투명도가 뛰어나며, 액화 및 고상과정에서 공기방울 형성이 작고, 자외선에 강하며, 투명도가 우수한 열경화성 수지인 EVA가 널리 사용된다. Table 5에 모듈 공정의 유해인자를 제시하였다.

Table 5. Module production process and hazards

Process	Exposure hazards
Tabbing/String	Isopropanol Flux
Automatic bushing	Ribbon(Pb, Sn, Cu alloy)
Module arraying/setting	Ribbon(Pb, Sn, Cu alloy)
Laminating	-
Inspection	-

4. 유해성 및 노출기준

4.1 물질의 유해성

태양광 산업의 단계별 제조공정에서는 다양한 물질이 사용되고 있다. Table 2부터 Table 5까지 정리된 물질들은 산업보건분야에서 어느 정도 유해성이 인정된 것들로 근로자가 장기간 높은 농도에 노출되는 경우 직업성 질환에 이환될 우려가 있는 물질들이다. 고용노동부와[8)] 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists: ACGIH)에서는[9)] 유해성이 높은 물질들을 중심으로 약 700여종에 대한 공기중 기준을 정하고 있다.

실리콘은 분자량인 28.1인 비결정형 규소로서 물에 녹지 않으며 상온·상압에서 고체

에 해당한다. 이 물질은 인체에 여러 장기에 대해 특별한 독성을 가지지 않은 것으로 알려져 있으나 공기를 통해 다량을 흡입하게 되면 진폐를 일으킬 수 있는 물질이다. 따라서 일반적으로 진폐를 일으키게 되는 분진들과 유사한 특성을 지니고 있다. 폐 내로 깊숙하게 침투가 가능한 5 마이크로미터 이하 분진의 경우 진폐의 위험이 보다 커지게 된다[9-11].

불화수소와 질산과 같은 산류는 인체의 상기도와 하기도, 눈 및 피부에 자극성과 부식성이 있다. 고농도의 산이 폐내로 흡입되면 인체의 방어기전에 의해 수포가 형성되고 심하게 되면 질식 등으로 사망할 수 있다. 불화수소는 치아에 반상치(fluorosis)를, 질산은 치아산식증(dental erosion)을 유발시킬 수 있다[9-11].

수산화나트륨과 수산화칼륨과 같은 강한 알칼리성 물질은 산류와 유사하게 인체의 상기도와 피부 및 눈에 자극성과 부식성을 가지고 있다. 특정 장기에 대해 중독성을 가진 물질은 아니나 고농도의 증기나 분진에 노출되면 폐수종 등이 발생될 수 있다[9-11].

실란은 자극성 냄새를 가진 가스로 연소성이 있고 눈, 피부 및 호흡기 점막에 자극성을 가진다. 또한 중추신경계에 장해를 일으킬 수 있는 물질로 알려져 있다. 이소프로필알코올은 상온·상압에서 액체로 역시 눈과 상기도에 자극성을 지니고 있으며 현기증, 두통 및 어지럼증과 같은 중추신경계 장해를 일으킬 수 있는 물질이다[9-11].

직업병 물질로 잘 알려진 대표적인 중금속인 납은 말초신경과 중추신경계를 공격하고 혈액장해를 유발할 수 있는 물질이다. 또한 신장뿐만 아니라 소화기계에 영향을 주어 복통을 일으킬 수도 있다. 아주 낮은 농도에서도 장애를 일으키는 대표적인 물질로 잘 알려져 있다[9-11].

기타 태양광 산업에서 근로자가 노출될 수 있는 중금속으로 은, 알루미늄, 구리 및 주석이 있다. 이들 금속은 납 정도로 유해성이 높지는 않으나 알루미늄의 경우 호흡기계 자극 및 폐렴과 중추진경장해를 유발시킬 수 있다. 구리의 흄과 분진에 노출되면 금속열이 유발되며, 구리는 피부 점막에 대한 자극과 소화기계에 대한 장해를 유발시킬 수 있는 물질로 널리 알려져 있다[9-11].

금속이나 무기화합물의 형태로 근로자가 노출될 가능성이 있는 주석은 폐렴을 일으키는 금속에 해당하며 주석폐(stannosis)라고 불리는 진폐의 일종에 관여하는 물질이기도 하다. 은은 은피증(argyria)의 원인이 되며 사람의 피부에 대해 광과민성의 증가와 멜라닌 색소의 침착을 유발시켜 청색 등으로 변하게 만든다. 사람의 눈을 청회색으로 변형시키기도 한다[9-11].

Table 6. Target organs for solar energy industry chemicals

Materials	Human effects
Silicon	Pneumoconiosis
HF	Irritation to skin, mucose membrane eye & upper/lower respiratory track, Fluorosis
HNO_3	Irritation to eye & upper respiratory track, dental erosion
NaOH	Irritation to skin, eye & upper/lower respiratory track
$Ca(OH)_2$	Irritation to skin, eye & upper/lower respiratory track
Silane	Irritation to skin, eye & respiratory track, CNS* effect
Silver(Metal)	Argyria
Aluminum(Particle)	Lower respiratory track irritation , Pneumoconiosis, CNS* effect
Lead(Inorganic)	CNS* and PNS** effect
Tin(Metal)	Pneumoconiosis, Stannosis
Copper(Particle)	Mucose membrane irritation, Gastrointestinal track effect, Metal fever
Isopropanol	Irritation to skin, eye & upper respiratory track, CNS* effect

*CNS : Central nervous system

**PNS : peripheral nervous system

4.2 노출기준

(1) 국내 노출기준

근로자가 노출될 수 있는 유해물질에 대한 노출기준은 우리나라의 경우 고용노동부의 화학물질 및 물리적 인자 노출기준이 있다[8]. 태양광 산업에서 근로자가 노출될 우려가 있는 Table 6에서 열거된 물질에 대한 고용노동부의 노출기준을 Table 7에 정리하였다. 근로자 노출기준은 하루 8-hrs 작업시간 동안 농도의 평균값으로 나타내는 경우가 일반적으로 이를 시간가중평균노출기준(Time Weighted Average : TWA)이라 하며 근로자에게 단시간 영향을 줄 수 있는 물질인 경우에는 단시간노출기준(Short Term Exposure Limit: STEL)이 설정되어 있다. 아주 짧은 시간에 자극 등 위해작용을 일으킬 수 있는 화학물질에 대해서는 단시간노출기준(Ceiling)이 정해져 있다. 물질에 따라서는 TWA 하나만 설정된 경우, TWA와 STEL이 동시에 설정된 경우, Ceiling만 설정된 경우 등 노출기준의 종류가 물질 특성에 따라 달라질 수 있다.

태양광 산업과 관련된 화학물질 중 일부($POCl_3$, $SiCl_4$ 등)는 노출기준이 없으나 기준이 없다고 해서 근로자에 대한 유해성이 없다고 단정 지어서는 안 된다. 이는 현재까지 단지 독성자료 등이 부족하여 기준이 설정되지 않은 것으로, 향후에 자료가 확보되면 기준이 새로이 설정될 수 있다. 또한 금속의 경우 분진이나 염의 형태에 따라 다른 노출기준이 적용될 수 있음에 유의하여야 한다.

(2) 국제적 노출기준

작업장 유해물질에 대한 노출기준은 국가마다 다르며 미국의 노출기준을 참고하여 자국 기준을 정하는 경우가 많다. 국제적으로 가장 권위를 지닌 노출기준은 미국산업위생전문가협회의 TLVs(Threshold Limit Values)이다. 일본과 우리나라를 비롯한 거의 대부분의 국가 노출기준은 이 기준은 참고하고 자국의 사회·경제적 상황을 고려하여 제정되고 있다.

Table 7. Korea occupational exposure limits for solar energy industry chemicals

Materials	Occupational Exposure Limits		
	TWA	STEL	Ceiling
Silicon	10 mg/m^3	-	-
HF	0.5 ppm	-	3 ppm
HNO_3	2 ppm	4 ppm	-
NaOH	-	-	2 mg/m^3
$Ca(OH)_2$	-	-	2 mg/m^3
Silane	5 ppm	-	-
Silver(Metal)	0.1 mg/m^3	-	-
Aluminum(Particle)	10 mg/m^3	-	-
Lead(Inorganic)	0.05 mg/m^3	-	-
Tin(Metal)	2 mg/m^3		
Copper(Particle)	1 mg/m^3	2 mg/m^3	-
Isopropanol	200 ppm	400 ppm	-

ACGIH-TLVs는 논문 등을 참고하여 매년 개정을 거듭하고 있으므로 최신성을 유지하고 있는 것이 특징이다. 따라서 노출기준이 현재 한국의 기준에 비해 낮거나 비현실적인 것으로 판단되는 경우 기준이 철회되기도 한다.

Table 8에서 정리된 바와 같이 실리콘의 경우 우리나라는 진폐에 대한 발생을 고려하여 10 mg/m^3으로 정해져 있으나 이는 ACGIH의 2006년도 이전 기준에 해당한다. ACGIH는 실리콘이 단순히 진폐만을 일으키는 물질이 아닌 것으로 판단하고 있지만 이 물질에 대한 독성자료가 부족하다고 판단하여 기준은 철회하고 새로운 기준의 설정을 현재 검

토하고 있다.

불화수소의 경우 피부와 점막에 대한 자극성이 매우 강한 물질로 한국은 최고노출기준을 3 ppm으로 정하고 있으나 ACGIH는 이를 2 ppm으로 낮추어 기준으로 삼고 있다.

금속분진 형태의 알루미늄에 대해 한국은 알루미늄폐를 우려 10 mg/m^{3}을 기준으로 하고 있으나 ACGIH는 폐렴과 중추신경 장해를 보고한 최신 자료를 근거로 2008년부터 1 mg/m^{3}으로 낮추어 적용하고 있다. 이때 알루미늄 분진은 10 마이크로미터 이하의 호흡성 분진(respirable dust)을 의미하고 있다. ACGIH의 기준은 미국 내에서 법적인 강제성을 가진 기준은 아니며 민간단체의 권장기준에 해당하지만 앞에서 언급된 바와 같이 국제적으로 가장 큰 권위를 지닌 작업환경 노출기준이다.

Table 8. ACGIH Threshold Limit Values (TLVs) for solar energy industry chemicals

물질명	TLVs		
	TWA	STEL	Ceiling
Silicon	Revocation in 2006		
HF	0.5 ppm	-	2 ppm
HNO_3	2ppm	4ppm	-
NaOH	-	-	2 mg/m^3
$Ca(OH)_2$	-	-	2 mg/m^3
Silane	5 ppm	-	-
Silver(Metal)	0.1 mg/m^3	-	-
Aluminum(Particle)	1 mg/m^3	-	-
Lead(Inorganic)	0.05 mg/m^3	-	-
Tin(Metal)	2 mg/m^3		
Copper(Particle)	1 mg/m^3	2 mg/m^3	-
Isopropanol	200 ppm	400 ppm	-

5. 유해물질의 관리

태양광 산업에서 근로자가 노출될 수 있는 유해물질에 대하여는 적절한 관리를 통해 직업병 이환을 예방할 수 있다. 이론적으로 가장 합리적으로 노출을 줄일 수 있는 방법은 유해성이 낮은 물질의 원료나 공정으로 대체하는 것이다. 하지만 이는 태양광 산업에서 현실적으로 수용하기는 가장 어려운 방법에 해당한다. 다음으로는 근로자의 노출을 최소화 하도록 공정을 밀폐하거나 격리하고 원격조종이나 무인방식으로 제품을 생산하는 방안이 있다. 특히 유해성이 높은 물질의 경우이지만 이 역시 현실적으로 적용이 어려운 경우가 대부분이다[12].

산업현장에서 근로자의 노출을 줄일 수 있는 합리적인 방법은 유해물질이 공기중으로 비산되지 않도록 발산원을 부분적으로 최대한 밀폐하거나 국소배기장치를 설치하는 것이다 산업안전보건법에서는 이 방법을 유해물질을 사용하는 공정에 적용하도록 하고 있다. 또한 국소배기장치를 설치하는 경우 사용하는 물질의 특성에 따라 최소한도의 배기성능을 정하고 있다[13].

산업안전보건법은 169종의 유해물질을 사용하여 근로자가 노출되는 경우 매년 2회 주기적으로 해당 공정의 해당 물질을 대상으로 작업환경측정을 하도록 하고 있으며 노출근로자에 대해서는 직업병 예방을 목적으로 특수건강진단을 실시하도록 하는 의무를 사업주에게 부과하고 있다. Table 6부터 Table 8까지 열거된 유해물질 중 작업환경측정과 특수건강진단에 해당하는 것은 실리콘(광물성 분진), 불산(불화수소), 질산, 수산화나트륨, 수산화칼륨, 은, 알루미늄, 납, 주석, 구리 및 이소프로판올이며 실란에 대해서는 노출기준은 있으나 작업환경측정과 특수건강진단에 대해서는 현재 특별히 규정하고 있지는 않다[13]. 사업주는 근로자가 해당 유해물질에 노출되는 경우 노출

기준을 준수하여 직업병이 발생하지 않도록 해야 한다.

5. 결 론

국내 태양전지 산업에서 근로자가 노출될 가능성이 있는 유해인자를 확인하여 해당 공정 근로자의 직업성질환 예방 정보를 제공하고자 한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 폴리실리콘 공정의 경우 옥외 장치산업으로 근로자 노출가능성은 적으나 메틸실리콘, 염화실란류, 규소(실리콘), 및 산(불산, 질산 등) 미스트가 유해요인이다.

(2) 실리콘 잉곳과 웨이퍼 제조공정은 규소(실리콘)가 주요 노출가능 유해인자이다.

(3) 태양전지 제조공정의 경우 불산, 질산 등의 산류와 수산화나트륨 및 수산화칼륨 등의 염기류, 삼염화실란, 삼염화산화인, 은 및 알루미늄 등의 금속류와 유기용제류가 주요 근로자 노출가능 유해인자로 파악되었다.

(4) 모듈을 생산하는 공정에서는 이소프로판올, 납땜에 사용되는 플럭스, 땜납(납, 주석, 구리 등의 합금)이 주 유해인자이다.

(5) 태양광 산업에서 사용되는 산과 알칼리류 및 모노실란은 피부와 점막 자극성을 가지고 있으며 금속류는 중추신경계 등에 영향을 미칠 수 있다. 특히 납은 저농도에서도 신경과 혈액에 대한 독성을 지니고 있다. 이소프로판올과 같은 유기용제류는 대표적인 중추신경 및 말초신경 장해물질이다.

(6) 태양광 산업의 근로자 노출 가능 화학물질에 대해 고용노동부가 노출기준을 설정하고 있으며, 근로자가 이 기준 이상의 농도에 노출되지 않도록 관리하여야 한다. 물질별로 법적으로 정해진 작업환경측정과 특수건강진단을 주기적으로 실시해야 한다.

(7) 화학물질에 대한 노출기준은 낮아지는 추세에 있으므로 국제적 기준을 주시하고 이 권장기준을 준수하려는 노력이 근로자 건강관리를 위해 필요하다.

후 기

본 연구는 한국산업안전보건공단의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호, 2012-연구원-1302)

참 고 문 헌

1. New and Renewable Energy Center for Korea Energy Management Corporation. New and renewable energy statistics 2010, 2011.
2. Kwon OS. Trend and development strategy for renewable energy industries, 2011.
3. Business Information Research, Collection book of renewable energy industries, BIR, 2012.
4. Occupational Safety and Health Research Institute for Korea Occupational Safety and Health Agency. Characteristics of hazards for workers in renewable energy industries, 2012.
5. Fumio S. Semiconductor silicon crystal technology, Academic Press, Inc., 1989.
6. Willian CO, Roberrt BH, Lee PH. Handbook of semiconducior silicon technology I, Noyes Publication, 1990.
7. Willian CO, Roberrt BH, Lee PH. Handbook of semiconductor silicon technology II, Noyes Publication, 1990.

8. The Ministry of Employment and Labor, Occupational exposure limit for chemicals and physical agents. 2013.
9. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2013 Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices, ACGIH. 2013.
10. US-Department of Health and Hunan Services, NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards, US-DHHS, 2005.
11. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Documentations of Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents, ACGIH. 2013.
12. American Industrial Hygiene Association, The Occupational Environment: Its Evaluation, Control, and Management 2nd Ed,, Edited by R. DiNardi, 2003.
13. The Ministry of Employment and Labor, Occupational Safety and Health Act. 2013.