

LCD 제조공정의 이온화 장치에 대한 전리방사선 지역노출특성 분석

김준범^{1,2} · 정은교¹ · 정기효^{2,3*}

¹한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원, ²울산대학교 안전보건전문학과, ³울산대학교 산업경영공학부

Analysis of Local Exposure Levels of Radiation Emitted from Soft X-ray Ionizers in LCD Manufacturing Processes

JoonBeom Kim^{1,2} · Eun-Kyo Chung¹ · Kihyo Jung^{2,3*}

¹Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

²Department of Safety and Health, University of Ulsan

³School of Industrial Engineering, University of Ulsan

ABSTRACT

Objectives: This study analyzed the local exposure levels of radiation emitted from the equipment with soft X-ray ionizers to investigate the radiation exposure levels in Liquid Crystal Display(LCD) manufacturing processes.

Methods: This study measured the local radiation levels for the equipment installed in two LCD manufacturing companies. The equipment were installed at diverse processes and equipped with various number of ionizers. The local radiation levels were measured on the surface of the equipment by using direct reading equipment, and the measurements were converted into annual effective dose by considering the radiation exposure time of workers. Statistical analyses were performed to investigate the radiation exposure characteristics.

Results: Annual effective doses for 97.6% of the equipment being measured were less than 1 mSv. However, the range of annual effective doses was 0.004 mSv ~ 2.167 mSv, which indicated a large variation among the equipment. Statistical analyses of the study found that this large variation was raised due to improper shielding of the equipment rather than process and/or equipment characteristics. To pinpoint the cause of this large variation in annual effective dose, this study improved the shielding of the equipment being radiated over 1 mSv and found that their average effective dose was reduced from 1.604 mSv to 0.126 mSv after shielding improvement.

Conclusions: Relatively high exposure levels of radiation were observed in some equipment where their shielding were insufficiently thick and/or sealed. This finding implies that the shielding of the equipment is an important engineering countermeasure to control the radiation exposure levels in industries.

Key words: LCD manufacturing company, ionizer, radiation, exposure level

I. 서 론

LCD (liquid crystal display) 제조공정은 백혈병과 같은 암 발생으로 사회적 이슈가 된 반도체 제조공정과 유사한 작업환경(예: 전리방사선)을 보유하고 있다


(Kim, 2016). 우리나라의 법원은 2011년에 반도체 노동자의 질병을 산업재해보상보험법상 업무상 질병으로 처음 인정하였고, 근로복지공단은 2013년 처음 반도체 노동자의 백혈병을 업무상 질병으로 인정한 이래로 2018년 6월까지 반도체 및 LCD 제조공정 노동자 총


*Corresponding author: Kihyo Jung, Tel: 052-259-2709, E-mail: kjung@ulsan.ac.kr

93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan

Received: August 5, 2021, Revised: September 27, 2021, Accepted: November 7, 2021

 JoonBeom Kim <https://orcid.org/0000-0001-6499-1454>

 Eun-Kyo Chung <https://orcid.org/0000-0002-6515-4428>

 Kihyo Jung <https://orcid.org/0000-0003-3316-2762>

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.

28명의 직업성암을 산업재해로 인정하였다. 그 중에서 8건(반도체 7명, LCD 1명)은 직업성암 발생의 주요 인정근거로 전리방사선이 지목되었다(Lim, 2018). 최근에는 반도체 및 LCD 제조공정에서 전리방사선과 벤젠 등에 노출될 수 있는 노광장비 설치 및 유지보수 업무에 근무하다 폐암에 걸린 협력체 직원이 사망 7년 만에 산업재해 인정을 받았다(Hankookilbo, 2020).

LCD 제조공정에는 백혈병과 같은 직업성암을 유발할 수 있는 전리방사선의 일종인 X선을 이용한 정전기 제거장치(이하, 정전기 제거장치)가 사용된다. LCD 제조공정은 정전기로 인해 미세 먼지가 LCD 패널에 붙어 발생하는 제품 불량을 방지하기 위해 코로나방전을 이용한 이온바(ion bar) 및 이온블로워(ion blower)가 사용되어왔다. 그러나 최근에는 연 X선(soft X-ray; 투과력 0.12 ~ 12 kV)을 이용한 정전기 제거장치가 주로 사용되고 있다(Jung et al., 2006; Chung, 2017). Jeong & Lee (2016)와 Chung et al. (2015)은 정전기 제거장치의 효율을 향상시키기 위해 정전기 제거장치에서 발생하는 방사선을 측정하는 연구를 수행하였다. 그러나 아직까지 근로자의 건강보호를 위한 정전기 제거장치의 방사선 노출수준을 산업현장에서 측정 및 분석한 연구는 부족한 실정이다.

정전기 제거장치를 사용하는 LCD 제조공정은 원자력안전법(시행령 제131조~제133조)에 따라 방사선량 및 방사성물질 등에 의한 오염상황 측정, 건강진단, 피폭선량 평가 및 피폭관리 등을 실시해야 하는 의무가 있다(NSSC, 2021). 그로 인해, LCD 제조공정에서는 노출선량을 관리하기 위해 개인선량계를 활용해 3개월 동안 근로자에게 누적 노출된 방사선량을 측정하고 있다. 그러나 개인노출선량 측정은 원자력안전법에서 정한 선량한도 관리에 효과적이나 방사선 노출 수준이 심한 장치 및 작업지역을 파악하여 작업환경을 개선하는 대책 수립에 활용하기 어려운 한계점이 있다. 개인선량계를 활용해 측정된 개인노출선량은 장기간(예: 3개월) 근로자에게 누적 노출된 방사선의 총량을 관리할 수 있게 한다. 그러나 개인노출선량 측정은 방사선발생장치 정비 후 이음새가 헐거워져 발생한 틈 등에서 일시적으로 방사선이 누출되거나(Park & Chung, 2012), 공정 중 방사선 노출 수준이 높은 장치(지역) 등을 파악하여 개선대책을 수립하는데 활용이 제약된다. 따라서 LCD 제조공정의 방사선노출 특성과 작업환경 개선을 위한 대책 수립을 위해서는 방사선의 지역노출수준을 측정

및 평가하는 연구가 필요하다.

본 연구는 LCD 제조공정에서 연 X선 기반 정전기 제거장치를 사용하는 설비에 대해 전리방사선 지역발생 수준을 측정 후 작업자의 방사선량을 분석하였다. 이를 위해 본 연구는 2개의 LCD 제조사에서 정전기 제거장치를 사용하는 다양한 설비에 대한 전리방사선 지역 발생수준을 측정하였다. 그리고 난 후, 작업자의 작업 특성(노출 빈도 및 시간)을 고려하여 연간 방사선량을 예측하였다. 공정 및 장치에 따른 방사선 노출특성을 파악하기 위해 방사선량이 주공정(main process), 단위 공정(unit process), 장비에 따라 유의한 차이가 있는지 통계적으로 분석하였다. 또한, 방사선량이 높게 측정된 장비에 대해서는 방사선 지역발생수준이 높은 이유를 분석하고 개선 대책 입안 및 적용 효과를 정량적으로 평가하였다. 본 연구의 결과는 LCD 제조공정의 전리방사선을 통제 및 관리하는데 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

II. 연구 대상 및 방법

1. 연구대상

본 연구는 Table 1에 요약된 것과 같이 가공(fabrication) 라인과 모듈(module) 라인으로 구성된 LCD 제조사 2곳(이하, A사와 B사)을 대상으로 하였다. 본 연구는 제조사별 가공라인 2개소(이하, A-1, A-2, B-1, B-2)와 B사의 모듈라인 1개소(이하, B-3)에서 유리기판의 정전기 제거를 목적으로 사용하는 정전기 제거장치에서 발생하는 방사선(X선)을 측정하였다.

A사는 가공라인(A-1, A-2)에서 이온화 장치(ionizer)를 사용한 정전기 제거장치를 사용하고 있었으나 모듈라인은 코로나 방전을 이용한 이온바 형태의 정전기 제거장치를 사용하고 있어 가공라인만 방사선을 측정하였다. 한편, B사는 가공과 모듈라인에 공히 이온화 장치를 사용하고 있어 가공라인(B-1, B-2)과 모듈라인(B-3)에서 방사선을 측정하였다. 연구 대상 사업장에서 사용하고 있는 이온화 장치는 국내 생산 장비 1종과 일본 생산 장비 1종으로 조사되었으며, 국내 생산 장비의 전압은 9.5 kV (최대전류 0.15 mA)으로 일본 생산 장비의 전압인 11 kV (최대전류 0.28 mA)보다 다소 낮았다.

이온화 장치를 사용하는 정전기 제거장치는 주공정에 따라 사용되는 단위공정이 다른 것으로 조사되었다. 먼저, 박막트랜지스터(TFT) 주공정은 Photo 단위 공정과

Table 1. Basic characteristics of the LCD manufacturing companies involved in this study

Company	Production line	Main process	Unit process	Equipment using ionizer	Number of equipment	Number of ionizers installed in each equipment
A	A-1 (Fabrication)	TFT	Photo	Stepper	1	1
					3	2
					2	3
				1	4	
				Coater	4	1
					1	3
	Developer	1	2			
		3	3			
	LC	Rubbing	Rubbing	3	5	
	A-2 (Fabrication)	TFT	Photo	Coater	2	2
					1	8
				1	10	
				Stepper	3	4
		1	6			
		CF	Photo	Coater	2	2
LC		Polyimide	Polyimide printer	1	4	
		Rubbing	Rubbing	2	7	
	Single rubbing aging		1	10		
B	B-1 (Fabrication)	TFT	Dry etch	Ultrasonic dry cleaning system	2	4
			Photo	Stepper	3	1
		CF	Photo	Stepper	1	1
					2	2
		LC	Filling	One drop filling	2	2
			Polyimide	Polyimide printer	1	9
	Rubbing		Rubbing	1	33	
				1	41	
	Measurement	Align inspector	1	1		
	B-2 (Fabrication)	TFT	Photo	Coater	3	2
					CF	Stepper
		LC	Filling	One drop filling	1	1
					2	2
					1	3
1					4	
3					5	
1					6	
1					10	
1					12	
1					14	
2					24	
Polyimide	Polyimide printer	3	6			
		2	64			
B-3 (Module)	Module	Adhesion of polarizer	Cullet, clean and polarizer	8	2	

Dry Etch 단위 공정에서 정전기 제거장치를 사용하고 있었다. 컬러필터(CF) 공정은 Photo 단위 공정, Stepper 단위 공정에서 이온화 장치를 사용하고 있었으며, 액정(LC) 공정은 Rubbing 단위 공정, Polyimide(PI) 단위 공정, Filling(dropping) 단위 공정에서 이온화 장치를 사용하고 있었다. 모듈 공정은 편광판부착(adhesion of polarizer) 단위 공정에서 이온화 장치를 사용하는 것으로 나타났다. 마지막으로, 이온화 장치를 사용하는 장비는 각 단위 공정에 따라 1대~14대가 사용되고 있었으며, 각 장비에 장착된 이온화 장치는 1개~64개까지 다양한 것으로 조사되었다.

본 연구에 참여한 LCD 제조사는 원자력안전법에 따라 방사선작업종사자 및 수시출입자에 대해 개인선량계를 사용하여 3개월 동안 누적노출량을 측정하여 지속적으로 관리하고 있는 것으로 조사되어, 근로자의 방사선 노출특성은 사업장자료를 활용하여 파악하였다. A사업장은 총 11명의 근로자가, B사업장은 343명의 근로자가 개인선량계를 사용하여 노출방사선량을 관리하고 있는 것으로 조사되었다.

2. 방사선 측정 방법

본 연구는 방사선 발생 위치를 특정하기 위해 환경방사선을 측정할 수 있는 직독식 장비(personal portable dose rate and survey meter)인 Radiagem TM 2000(Canberra industries, Inc., U.S.A.)에 저에너지 범위의 X선 측정이 가능한 NaI(Tl)섬광검출기를 장착한 SX-2R 프로브를 이용하였으며, 측정에 사용된 장비는 사전에 검교정을 받았다. 섬광검출기는 신틸레이션 검출기(scintillation detector)로 불리는데 본 연구에서는 알람기능을 이용하여 방사선 발생여부만을 파악하는 보조장비로 사용하였다. 주 측정기로는 저에너지 X선 검출용 프로브가 부착된 전리함(ion chamber) 검출기인 OD-01 Hx survey meter (Sensortechnik und Elektronik Pockau GmbH(STEP), Germany)를 사용하였다. 본 연구에 사용된 SX-2R 프로브(5 KeV ~ 200 KeV)와 전리함 검출기(6 KeV ~ 15 MeV)의 에너지 측정 범위는 산업안전보건법의 방사선 정의인 '엑스선발생장치의 경우 5천 전자볼트(5 KeV) 이상의 에너지를 가진 전자선'을 측정할 수 있는 범위의 장비이다. 본 연구의 방사선은 이온화 장치가 설치된 장비의 표면 또는 이온화 장치가 설치된 장비가 스테인리스 스틸이나 무정전 PVC로 차폐된 경우는 차폐된 표면에서

약 10 cm 거리에서 측정하였다. 또한, 방사선 측정은 장비 또는 차폐물 표면의 좌측 상단에서 우측 하단까지 지그재그로 표면을 스캔하면서 여러 부위에서 측정하였으며, 그 중에서 최댓값을 분석에 사용하였다.

이온화 장치를 사용하는 장비로부터 발생하는 방사선 수준이 타 장비에 비해 높은(연간 방사선량 1 mSv 이상) Coater기 1대와 Rubbing기 1대에 대해서는 방사선 발생 저감 대책을 적용한 후 재측정을 실시하였다. 개선 전후 방사선 측정의 위치와 장비의 가동조건은 동일하게 통제되었다. 그러나 Rubbing기의 경우 개선 전 측정 시에는 장비 끝단이 차폐되지 않아 장비의 끝단이 개방된 상태에서 방사선을 측정하였다. 반면, 개선 후에는 개선 전과 동일한 위치(장비로부터 떨어진 거리)에서 방사선을 측정하였으나 차폐물이 설치되어 장비의 끝단이 완전히 차폐된 상태였다.

3. 데이터 처리 및 통계 분석 방법

본 연구는 이온화 장치를 사용하는 장비로부터 측정된 방사선 지역발생수준을 측정한 후 방사선방호 등에 관한 법(원자력안전법의 방사선 종사자: 연간 50 mSv 이하, 5년간 100 mSv 이하; 원자력안전법의 수시출입자 및 운반종사자: 연간 6 mSv 이하; 그 외 종사자: 연간 1 mSv 이하) 및 기준(원자력안전위원회 고시: 연간 20 mSv 이하, 주당 1 mSv 이하)과 비교하기 위하여 연간 방사선량으로 변환되었다(NSSC 2019; NSSC 2021). 측정된 방사선 지역발생수준을 연간 방사선량으로 변환하기 위해서는 근로자가 매일 방사선에 노출되는 평균 시간을 추정하는 것이 필요하다. 이온화 장치는 LCD 제조에 필요한 유리기판을 장비에 투입할 때마다 정전기 제거를 위해 약 10초 정도 작동하게 된다. 본 연구에 참여한 두 사업장은 일평균 1,200장 ~ 1,800장의 유리기판을 사용하고 있는 것으로 파악되었으며, 근로자가 3교대 근무를 하고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 근로자별 유리기판 투입 개수는 400장 ~ 600장이며, 그로 인해 이온화 장치의 최대 가동시간은 100분(6000초 = 600장 × 10초)으로 추정된다. 그러나 대부분의 공정은 자동화되어 있어 근로자는 장비근처에 상주하지 않고 라인 내 별도의 엔지니어 룸이나 가공라인 외부에 위치한 ROS(remote operation system) 룸에서 상주하며, 모니터조작 등을 위해 잠깐 동안 장비에 접근하는 것으로 조사되었다. 따라서 실제 근로자가 장비 조작 등을 위해 장비근처에 상주하는 시간(실제로

방사선에 노출될 수 있는 시간)은 작업 특성 분석과 근로자 면담 결과를 토대로 최대 10분으로 예측되었다. 한편, Rubbing 공정에서는 작업 형태에 따라 러빙포를 근로자들이 2인 1조로 직접 교체하는 작업이 있어 근무당 평균 약 40분 정도 Rubbing기 인근에서 작업하는 것으로 파악되었다. 러빙포 교체 작업 중에는 Rubbing기의 전원을 차단하고 작업하기 때문에 방사선에 노출되지 않을 것으로 판단되나, 전원을 차단하기 전후에 러빙포 교체 준비 및 확인을 위해 Rubbing기 인근에 근로자가 머무는 시간 등이 발생할 수 있다. 본 연구는 Rubbing기 작업을 수행하는 근로자와 인터뷰를 통해 하루에 최대 6분 정도 방사선에 노출될 가능성이 있는 것으로 파악하였다.

본 연구의 통계 검정은 PASW (v24.0, IBM)를 사용하여 이루어졌다. 통계 분석은 유의수준 0.05를 적용하여 이루어졌으며, 통계 검정은 데이터의 특성에 따라 t검정, paired-t검정, 그리고 일원분산분석을 적용하였다.

III. 결 과

1. 근로자 노출수준

개인선량계를 사용한 누적노출량 측정대상자는 모두 장비 및 설비보전을 하는 테크니션으로 나타났으며, A사업장 근로자 11명과 B사업장 근로자 342명 모두 개인별 노출농도는 연간 0.04 mSv (분기별 0.01 mSv)로

Table 2. Range of local exposure levels of radiation from soft x-ray ionizer in terms of company, production line, main process, unit process, and equipment

Production line	Main process	Unit process	Equipment using ionizer	No of ionizer	Range of local exposure level (μSv/hr)		Exposure time(min)	Range of exposure level per week (mSv/week)		Range of effective dose (mSv/yr)	
					Min	Max		Min	Max	Min	Max
A-1	TFT	Photo	Stepper	4	0.2700	0.9000	10	0.0002	0.0008	0.0117	0.0390
				3	0.2000	1.2000	10	0.0002	0.0010	0.0087	0.0520
				2	0.2000	0.4000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0173
				2	0.2000	0.5000	10	0.0002	0.0004	0.0087	0.0217
				2	0.1000	0.6000	10	0.0001	0.0005	0.0043	0.0260
				1	0.2000	1.2000	10	0.0002	0.0010	0.0087	0.0520
				3	0.2000	0.4000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0173
			Coater	1	0.2000	1.4300	5	0.0001	0.0006	0.0043	0.0310
				3	0.2000	17.0000	5	0.0001	0.0071	0.0043	0.3683
				1	0.2000	3.0000	5	0.0001	0.0013	0.0043	0.0650
				1	0.2000	12.0000	5	0.0001	0.0050	0.0043	0.2600
				1	0.2000	0.9000	5	0.0001	0.0004	0.0043	0.0195
				3	0.3000	2.3400	5	0.0001	0.0010	0.0065	0.0507
	Developer	3	0.2000	1.5000	5	0.0001	0.0006	0.0043	0.0325		
		2	0.2000	2.5000	5	0.0001	0.0010	0.0043	0.0542		
		3	0.2000	2.0000	5	0.0001	0.0008	0.0043	0.0433		
		3	0.2000	2.0000	5	0.0001	0.0008	0.0043	0.0433		
LC	Rubbing	Rubbing	5	0.2000	1.7000	6	0.0001	0.0009	0.0052	0.0442	
			5	0.2000	6.9000	6	0.0001	0.0035	0.0052	0.1794	
			5	0.2000	1.5000	6	0.0001	0.0008	0.0052	0.0390	
A-2	TFT	Photo	Stepper	4	0.2000	0.5000	5	0.0001	0.0002	0.0043	0.0108
				4	0.2000	0.5000	5	0.0001	0.0002	0.0043	0.0108
				6	0.2000	0.5000	5	0.0001	0.0002	0.0043	0.0108
				4	0.2000	1.9400	5	0.0001	0.0008	0.0043	0.0420
			Coater	10	0.6000	0.7000	5	0.0003	0.0003	0.0130	0.0152
				8	1.0000	2.0000	5	0.0004	0.0008	0.0217	0.0433
				2	1.0000	5.0000	5	0.0004	0.0021	0.0217	0.1083
				2	12.0000	15.0000	5	0.0050	0.0063	0.2600	0.3250
	CF	Photo	Coater	2	40.0000	50.0000	10	0.0333	0.0417	1.7333	2.1667
				2	0.2000	15.0000	10	0.0002	0.0125	0.0087	0.6500
	LC	Rubbing	Rubbing	7	1.0000	8.0000	6	0.0005	0.0040	0.0260	0.2080
				7	9.0000	40.0000	6	0.0045	0.0200	0.2340	1.0400
			Single rubbing aging	10	17.0000	20.0000	5	0.0071	0.0083	0.3683	0.4333
Polyimide Polyimide printer			4	0.2000	1.2000	5	0.0001	0.0005	0.0043	0.0260	

Table 2. Continued

Production line	Main process	Unit process	Equipment using ionizer	No of ionizer	Range of local exposure level (μSv/hr)		Exposure time(min)	Range of exposure level per week (mSv/week)		Range of effective dose (mSv/yr)	
					Min	Max		Min	Max	Min	Max
B-1	TFT	Photo	Stepper	1	0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
				1	0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
		Dry etch	Ultrasonic dry cleaning system	4	0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
				4	0.5000	0.7000	10	0.0004	0.0006	0.0217	0.0303
		CF	Photo	Stepper	2	0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087
	1				0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
	2				0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
	LC	Polyimide	Polyimide printer	9	0.1000	0.2000	5	0.0000	0.0001	0.0022	0.0043
		Rubbing	Rubbing	41	0.1000	0.3000	6	0.0001	0.0002	0.0026	0.0078
				33	0.5000	0.7000	6	0.0003	0.0004	0.0130	0.0182
		Filling	One drop filling	2	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				2	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
	Measurement	Align inspector	1	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087	
	B-2	TFT	Photo	Coater	2	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043
2					0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
2					0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
CF		Photo	Stepper	2	0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
				2	0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
				2	0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
				2	0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
				2	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
LC		Filling	One drop filling	14	0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
				12	0.8000	0.9000	10	0.0007	0.0008	0.0347	0.0390
				5	0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
				24	0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
				2	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				6	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				1	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				2	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				4	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				3	4.0000	5.0000	10	0.0033	0.0042	0.1733	0.2167
				24	0.2000	0.3000	10	0.0002	0.0003	0.0087	0.0130
				10	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				5	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
5		0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087			
Polyimide		Polyimide printer	64	0.1000	0.2000	5	0.0000	0.0001	0.0022	0.0043	
			64	0.1000	0.2000	5	0.0000	0.0001	0.0022	0.0043	
			6	0.1000	0.2000	5	0.0000	0.0001	0.0022	0.0043	
			6	0.1000	0.2000	5	0.0000	0.0001	0.0022	0.0043	
	6		0.1000	0.2000	5	0.0000	0.0001	0.0022	0.0043		
B-3	Module	Adhesion of polarizer	Cullet, clean and polarizer	2	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				2	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				2	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				2	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				2	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				2	0.1000	0.8000	10	0.0001	0.0007	0.0043	0.0347
				2	0.1000	0.2000	10	0.0001	0.0002	0.0043	0.0087
				2	0.1000	5.0000	10	0.0001	0.0042	0.0043	0.2167

파악되어 원자력안전법에 의한 연간 유효선량 한도 이내인 것으로 분석되었다. 또한, 본 연구에 참여한 LCD 제조사는 산업안전보건법에 의해 실시하는 방사선에 대한 특수건강진단에서 모든 근로자가 정상으로 판정되었던 것으로 조사되었다.

2. 방사선 지역발생수준

본 연구의 방사선 지역발생수준은 Table 2와 같이 0.2 ~ 50.0 $\mu\text{Sv/hr}$ 의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 전체 측정 대상 장비(총 83대) 중에서 7대(Coater기 5대, Single rubbing aging기 1대, Rubbing기 1대)는

10 $\mu\text{Sv/hr}$ 이상의 높은 지역발생수준을 보이는 것으로 파악되었다. 높은 지역 방사선을 발생시켰던 Coater기 5대는 각각 12 $\mu\text{Sv/hr}$, 15 $\mu\text{Sv/hr}$, 15 $\mu\text{Sv/hr}$, 17 $\mu\text{Sv/hr}$, 50 $\mu\text{Sv/hr}$ 의 방사선을 방출하는 것으로 나타났다. 또한, Single rubbing aging기의 방사선은 20 $\mu\text{Sv/hr}$ 로 나타났으며, Rubbing기의 방사선 수준은 40 $\mu\text{Sv/hr}$ 로 측정되었다.

3. 방사선 지역노출특성

방사선방호 등에 관한 기준에서 제시하고 있는 선량 제약기준(연간 20 mSv를 초과하지 않고 1주당 1 mSv

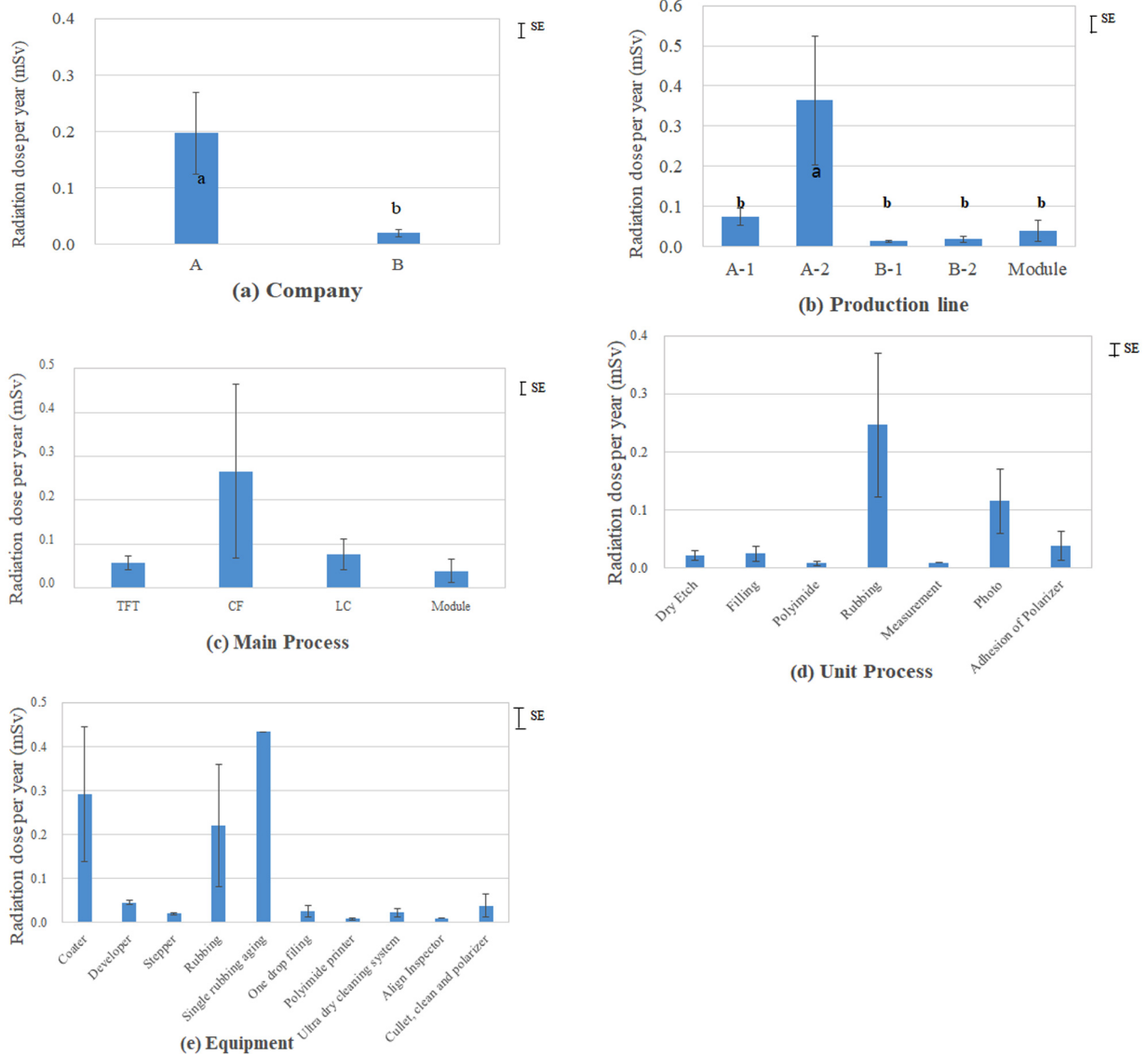


Figure 1. Effective dose by characteristics (alphabet small letters indicate statistical differences at significance level of 0.05)

를 초과하지 않아야 함)과 비교하기 위하여 방사선 지역발생수준을 연간(연간 방사선량) 및 주당(주당 방사선량) 노출수준으로 환산하였다. 장비에서 발생하는 주당 방사선량은 Table 2에 나타난 것과 같이 0.0417 mSv 이하로 주당 1 mSv를 초과하는 경우는 없는 것으로 나타났다. 연간 방사선량 역시 Table 2와 같이 2.1667 mSv 이하로 나타나 연간 20 mSv 기준을 초과하는 경우가 없는 것으로 분석되었다.

A사의 연간 방사선량은 Figure 1.a에 나타난 것과 같이 B사보다 통계적으로 유의하게 큰 것으로 분석되었다($t(32.415) = 2.445, p = 0.020$). A사의 평균 연간 방사선량은 0.197 mSv (SE = 0.072)로 측정되었으나, B사의 연간 방사선량은 0.020 mSv (SE = 0.006)로 상대적으로 낮게 측정되었다. A사의 평균 연간 방사선량은 B사의 약 10배 수준으로 파악되었다.

A-2 라인의 평균 연간 방사선량은 Figure 1.b에 나타난 것과 같이 다른 라인보다 통계적으로 유의하게 큰 것으로 분석되었다($F(4, 78) = 5.152, p = 0.001$). 연간 방사선량의 평균은 A-2 라인이 0.364 mSv (SE = 0.161)로 가장 높았고, 그 다음으로 A-1 라인 0.074 mSv (SE = 0.021), B-3(Module) 라인 0.038 mSv (SE = 0.026), B-2 라인 0.018 mSv (SE = 0.007), 그리고 B-1 라인 0.013 mSv (SE = 0.002) 순으로 나타났다. 연간 방사선량이 가장 높았던 A-2 라인의 방사선량은 가장 낮게 나타난 B-1 라인의 약 28배 수준으로 분석되었다.

주공정에서 발생하는 평균 연간 방사선량은 Figure 1.c에 나타난 것처럼 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다($F(3, 79) = 1.819, p = 0.150$). CF 공정의 평균 연간 방사선량은 0.266 mSv (SE = 0.199)으로 나타나 다른 공정(0.038 ~ 0.076 mSv)보다 현저히 큰 것으로 파악되었다. CF 공정의 연간 방사선량은 방사선량이 가장 낮게 나타난 Module 공정의 약 7배 수준으로 분석되었으나, CF 공정의 연간 방사선량 변동(SE = 0.199)이 다른 공정(SE = 0.016 ~ 0.035)보다 커서 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

단위 공정에서 발생하는 평균 연간 방사선량은 Figure 1.d에 나타난 것처럼 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다($F(6, 76) = 0.808, p = 0.567$). 평균 연간 방사선량은 Rubbing 공정(0.246 mSv)과 Photo 공정(0.115 mSv)이 다른 공정(0.007 mSv ~ 0.038 mSv)에 비해 현저히 높은 것으로 나타났다. 그

리나 Rubbing 공정(SE = 0.124)과 Photo 공정(SE = 0.055)은 산포가 다른 공정(SE = 0 ~ 0.026)보다 현저히 커서 통계적 유의성은 없는 것으로 파악되었다.

장비별 평균 연간 방사선량은 Figure 1.e에 나타난 것처럼 통계적으로 유의하게 차이가 없는 것으로 분석되었다($F(9, 73) = 1.695, p = 0.106$). 평균 연간 방사선량은 Single Rubbing Aging 0.433 mSv, Coater 0.291 mSv, 그리고 Rubbing 0.220 mSv가 다른 장비(0.007 ~ 0.045 mSv)보다 현저히 큰 것으로 나타났다. 특히, 연간 방사선량의 평균이 가장 높았던 Single Rubbing Aging의 방사선량은 가장 낮았던 PI Printer의 약 62배 수준으로 파악되었다. 그러나 평균 연간 방사선량이 큰 장비의 방사선량 변동(예: Rubbing기의 SE = 0.969)이 작았던 장비(예: Stepper의 SE = 0.003)보다 커서 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다.

4. 장비의 차폐 등 개선 대책 실시 전후 방사선량 비교

본 연구는 A사의 이온화 장치에서 발생하는 연간 방사선량이 1 mSv 이상으로 측정된 장비에 대해 무정전 PVC 재질로 차폐(밀폐) 및 차폐물 두께 강화 등 개선대책을 적용한 후 이온화 장치에서 발생하는 방사선량을 재측정하였다. A사에서 개선 대상이 된 장비는 Rubbing기와 Coater기였다. Rubbing기는 러빙포 교체를 작업자가 용이하게 할 수 있도록 장비 끝단을 차폐를 하지 않은 상태였다. Coater기는 차폐가 되어 있었으나 차폐재 끼리 완벽하게 밀폐되지 않아 틈이 있었고 차폐재의 두께가 충분하지 못한 상태였다. 개선 대책을 실시한 장비의 개선 전

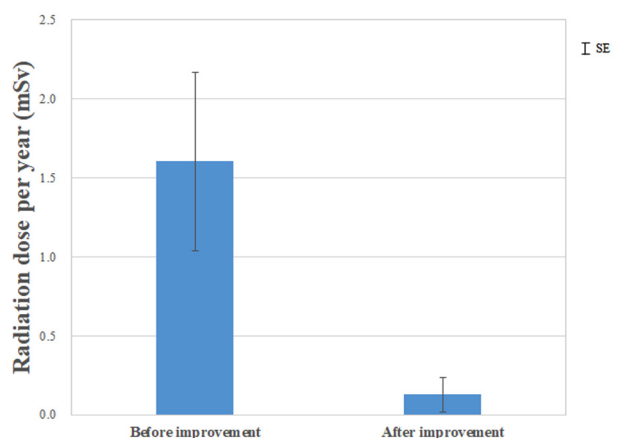


Figure 2. Comparison of effective dose before/after improvement

평균 연간 방사선량은 Figure 2와 같이 1.604 mSv (SE = 0.564)로 측정되었으나, 개선 후 연간 방사선량은 0.126 mSv (SE = 0.109)로 현저히 감소하였다. 개선 전 평균 연간 방사선량은 개선 후 연간 방사선량의 약 14.7배 수준으로 파악되었다. 그러나 표본 크기가 작아 개선 대책을 적용하기 전과 후의 방사선량 차이는 통계적으로 유의하지 않았다($t(1) = 2.199, p = 0.272$).

5. 이온화 장치 개수와 방사선 지역발생수준의 상관관계

이온화 장치의 수와 방사선 지역발생수준 간의 상관관계는 Figure 3에 나타난 것과 같이 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다($r = -0.067, p = 0.549$). 이온화 장치의 개수(1개 또는 2개)가 적은 장비의 평균 방사선 지역발생수준은 1.830(± 3.477) mSv/hr와 3.213(± 9.467) mSv/hr로 나타났다. 한편, 이온화 장치의 개수(41개와 64개)가 많은 장비의 방사선 지역발생수준은 이온화 장치의 개수가 적은 경우와 유사하거나 오히려 그 보다 작은 0.300(-) mSv/hr와 0.200(-) mSv/hr로 파악되었다.

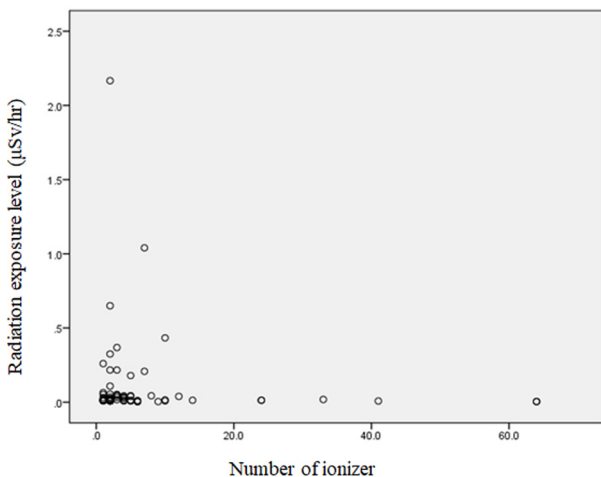


Figure 3. Relationship between the number of ionizers and the level of radiation

IV. 고 찰

본 연구에 참여한 2개의 LCD 제조사의 연간 방사선량은 0.004 ~ 2.167 mSv의 범위를 보이는 것으로 파악되었다. 원자력안전법에 따르면(NSSC, 2021) 유효선량 한도는 방사선 작업종사의 경우 연간 50 mSv를 넘지 않으면서 5년간 100 mSv (연평균 20 mSv)이며, 수

시출입자 및 운반종사자는 연간 6 mSv이고, 그 외의 종사자는 연간 1 mSv이다. 또한, 원자력안전위원회 고시(제2019-10호) 제13조는 연간 방사선량 20 mSv 초과 또는 주당 방사선량 1 mSv를 초과하지 않도록 선량을 제한하고 있다. 본 연구의 LCD 사업장의 연간 방사선량은 원자력안전법 및 원자력안전위원회 고시의 기준 대부분을 충족하지만, 원자력안전법에서 정한 그 외 종사자에 대한 유효선량 한도를 충족하지 못하는 일부 장비가 있는 것으로 해석된다. 그러나 본 연구는 유효선량을 계산할 때 근로자들이 방사선에 노출되는 정확한 시간을 확인할 수 없어 근로자들이 하루에 5-10분간 방사선 발생 장비 인근에서 작업하는 작업 특성과 인터뷰 결과를 고려하여 하루 최대 작업시간을 추정하였다. 또한, 정전기 제거장치는 이온화 장비가 앞뒤 또는 좌우로 반복 이동하면서 작동하기 때문에 실제 근로자에게 노출되는 방사선 수준은 높은 수준과 낮은 수준이 반복되거나 본 연구는 신틸레이션 검출기를 사용하여 방사선이 높게 발생하는 지점을 파악한 후 전리함 검출기로 방사선을 방출하는 장비의 표면에서 약 10 cm 떨어진 곳에서 방사선 지역발생수준을 측정하였다. 지역발생수준은 역자승법칙에 따라 측정 거리의 제곱에 반비례하므로 (Chung et al., 2015) 작업자들이 작업시간 동안 장비에 인접하는 거리, 빈도, 그리고 시간에 따라 본 연구의 연간 방사선량은 달라질 수 있다. 그러므로 본 연구에서 측정된 지역발생수준을 기준으로 계산한 연간 방사선량을 원자력안전법의 선량한도 기준과 비교를 위한 개인 노출수준으로 해석하는 것은 주의가 필요하다.

방사선을 측정한 총 83개의 장비 중에서 연간 방사선량이 1 mSv 이상인 경우는 총 2건(LC공정 Rubbing기 1건, CF Photo 공정 Coater기 1건)으로 나타났다. LC공정의 Rubbing기는 연간 방사선량이 1.040 mSv로 평가되었고, CF Photo 공정의 Coater기는 유효선량이 2.167 mSv로 평가되었다. 그러나 동일한 Rubbing기를 사용하더라도 사업장 라인별 연간 방사선량에 현저한 차이가 있는 것으로 나타났다. 예를 들면, A사업장 A-2라인의 LC공정에서 사용되는 Rubbing기의 연간 방사선량은 1.040 mSv였으나 모든 Rubbing기의 방사선량 평균(표준편차)이 0.220(± 0.370) mSv로 나타나 Rubbing기의 작동/작업 환경에 따라 차이가 큰 것으로 해석되었다. 예를 들면, 대부분 Rubbing기는 스테인리스 스틸이나 무정전 PVC 재질로 차폐되어 정상적인 작업 상태에서 발생하는 방사선 수준이 낮으나, Rubbing기는 작업

특성으로 인해 근로자들이 2인 1조로 러빙포를 교체하는 작업이 있어 작업의 편의상 장비 끝단이 완벽히 차폐되지 않는 경우에 방사선 노출 수준이 높을 수 있다.

연간 방사선량이 높았던 Rubbing기와 Coater기는 차폐할 경우 방사선량의 수준을 현저히 감소시킬 수 있는 것으로 파악되었다. 본 연구는 Rubbing기의 끝단을 개폐가 가능한 차폐물로 차폐한 후 방사선량을 평가한 결과, 기존 방사선량(1.040 mSv)이 차폐 후에는 0.234 mSv으로 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 연간 방사선량이 2.167 mSv으로 높았던 Coater기는 차폐물의 두께를 보강하고 이음새에서 누출이 없도록 밀폐한 뒤 방사선량을 측정된 결과 0.017 mSv로 현저히 감소한 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과는 LCD 공정의 연간 방사선량을 통제하기 위해서는 방사선이 작업자에게 직접적으로 노출되지 않도록 차폐물을 설치하고 방사선을 충분히 방호할 수 있는 차폐물 두께 적용이 필요함을 시사하고 있다.

본 연구의 대상이 된 LCD 공정의 연간 방사선량의 범위는 기존 연구의 반도체 제조공정의 결과와 유사한 것으로 파악되었다. 본 연구의 LCD 공정에 대한 연간 방사선량의 범위는 0.004 ~ 2.167 mSv로 평가되었다. 한편, Park et al. (2012)는 반도체 제조공정의 이온주입장비(임플란터) 등에서 발생한 표면선량의 범위를 0.15 ~ 42.30 μ Sv/h으로 보고하였으며, 이를 본 연구에서 적용한 하루 10분 노출기준을 적용할 경우 연간 방사선량의 범위는 0.001 ~ 1.833 mSv으로 본 연구의 범위와 유사하다.

기존 연구(Chung et al., 2015; Jeong & Lee, 2016)는 모노형(1개) X선 발생장치의 선량을 1.64 mSv/hr, 멀티형(7개) X선 발생장치의 선량을 3.51 ~ 4.04 mSv/hr로 선원의 개수에 따라 차이가 있다고 보고하였다. 그러나 본 연구는 장비에 설치된 이온화 장치의 개수와 방사선 지역발생수준 간에 통계적으로 유의한 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 현장의 장비들이 모두 차폐되어 있는 관계로 차폐물 밖에서 방사선 지역 발생수준을 측정했기 때문에 이온화 장치의 개수에 의한 영향보다는 차폐물의 두께 등에 의한 차폐 영향이 더 컸기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구의 결과를 일반화하기 위해서는 2가지 후속 연구가 필요하다. 첫째, 본 연구는 LCD 제조사 2곳을 대상으로 정전기 제거장치에서 발생하는 방사선을 측정 및 분석하였다. 따라서 본 연구의 결과를 일반화하기 위

해서는 보다 많은 LCD 제조사에 대한 방사선 측정 연구가 요구된다. 둘째, 본 연구는 정전기 제거장치에서 발생하는 방사선에 노출되는 시간을 작업 특성 분석과 근로자 인터뷰를 통해 추정하였다. 그러나 연간 방사선량은 노출 시간과 밀접한 관련이 있으므로 보다 정확한 방사선량을 도출하기 위해 작업 분석 등을 통해 보다 정확한 노출 시간을 측정하여 적용하는 것이 필요하다.

V. 결 론

본 연구는 LCD사업장에서 정전기 제거를 목적으로 사용되는 이온화 장치의 방사선 발생 수준을 측정하고 작업자의 방사선 노출 특성(빈도 및 시간)을 고려하여 연간 방사선량을 예측 및 분석하였다. LCD사업장의 연간 방사선량은 측정대상 장비(총 83개)의 97.6%(81개)에서 연간 1 mSv 이하로 측정되었다. 그러나 연간 방사선량의 범위는 연간 0.004 mSv ~ 2.167 mSv으로 나타나 장비의 작업조건에 따라 방사선 노출수준에 편차가 있는 것으로 파악되었다. 본 연구는 연간 방사선량이 1 mSv를 초과하는 2개의 장비에 대해 방사선 노출 원인을 분석한 결과, 방사선을 방생시키는 이온화 장비의 차폐가 충분하지 않을 때 방사선 노출이 심한 것으로 나타났다(예: 차폐물 사이에 틈이 있거나, 차폐재의 두께가 충분하지 않음). 연간 방사선량이 높았던 장비는 차폐물을 보완하기 전에 평균 1.604 mSv (SE = 0.564)였으나, 차폐 보완 후에는 평균 0.126 mSv (SE = 0.109)로 현저히 낮아졌다. 따라서 본 연구의 결과는 이온화 장치로부터 발생하는 방사선 수준을 낮추기 위해 차폐물의 재질 및 두께를 충분히 고려하여 차폐를 하고 설비의 이음새로부터 누출이 없도록 밀폐하여 관리하는 것이 필요함을 시사하고 있다.

감사의 글

본 연구는 산업안전보건연구원의 자체연구과제로 수행한 결과입니다.

References

- Choi KM, Lee JE, Cho KY, Kim KS, Cho SH. Clean Room Structure, Air Conditioning and Contamination Control Systems in the Semiconductor Fabrication

- Process. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2015; 25(2):202-210. (<http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2015.25.2.202>)
- Choi KM, Yeo JH, Jung MK, Kim KS, Cho SH. Size, Shape, and Crystal Structure of Silica Particles Generated as By-products in the Semiconductor Workplace. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2015;25(1):36-44. (<http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2015.25.1.36>)
- Chung EK, Kim KW, Ro JW, Jang MY. A study on the development of a guide for work environment management in LCD panel manufacturing processes. Occupational Safety and Health Research Institute Research Report. 2017.
- Chung EK, Kim KB, Song SW. Exposure Assessment and Management of Ionizing Radiation. J of the Korean Society of Safety 2015;25(1):27-35. (<http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2015.25.1.27>)
- Chung EK, Park HH, Shin JA, Jang JK. Assessment of hazardous substances and work environment for cleanrooms of microelectronic industry. J of the Korean Society of Safety 2009;19(3): 280-287.
- Hankookilbo. An employee of partner company of samsung semiconductor and LGD who died of lung cancer was recognized as an industrial accident 7 years after death. Sep. 21. 2020 [Accessed 17 June 2021] Available from: <https://hankookilbo.com/News/Read/a2020092116240004572>
- Hong JR, Koo JH, Park CS, Choi KM. Design of local exhaust ventilation for preventive maintenance in semiconductor fabrication industry using CFD. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2019;29(2):208-216. (<http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2019.29.2.208>)
- Jones JH. Exposure and control assessment of semiconductor manufacturing. AIP Conference Proceeding 166,44(1988). Published Online 29 May 2008. (<http://doi.org/10.1063/1.37130>)
- Jung CY, Park HK, Lee DH. A Study for Development and Characteristics of Electrostatic Eliminator Suitable for the Super Clean Room Less than Class 100(Ⅰ). J of the KOSOS 2006;21(4):60-65.
- Jeong PH, Lee DH. Development of Radiation Free Soft X-Ray Ionizer with Ion Control. J of the Korean Society of Safety 2016;31(5):22-27.
- Kim KW, Jeong EK, Park SH, Kim KB, Lee KY, Park HD, Seo HK, Kang JH, Kim SH, Ro JW, Hwang ES. Characteristics of worker's exposure to hazardous agents in LCD panel manufacturing process. Occupational Safety and Health Research Institute Research Report. 2016.
- Lee SH, Lee DH. Development of Multi-Type Soft X-ray Ionizer using Radiation Dose Overlapped Effect. J of the Korean Society of Safety 2018;33(2):28-31.
- Lim JW. Conformance of occupational diseases and cases of court rulings in the semiconductor industries. The proceeding of the 51th safety & health week seminar. 2018.
- Nuclear Safety and Security Commission (NSSC). Notice of Standard for radiation protection (2019-10). 2019.
- Nuclear Safety and Security Commission (NSSC). Enforcement Decree of Nuclear Safety Act. 2021.
- Park DU, Lee KM. Critical review of retrospective exposure assessment methods used to associate the reproductive and cancer risks of safer fabrication workers. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2012; 22(1):9-19.
- Park SH, Jeong EK. Development of guidance for work environment management in the semiconductor Industry. Occupational Safety and Health Research Institute Research Report. 2012.
- Park SH, Jeong EK, Shin JA, Lee KY, Park HD, Lee NR, Park HH, Kwon JW, Seo HK, Kim KB, Jeong KJ. Work Environment and Exposure Characteristics for Hazardous Factors on the Workers in the Semiconductor Industry. Occupational Safety and Health Research Institute Research Report. 2012.
- Park SH, Park HD, Ro JW. Types & Characteristics of Chemical Substances used in the LCD Panel Manufacturing Process. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2019;29(3):310-321. (<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2019.29.3.310>)
- Woskie SR, Hammond SK, Hines CJ, Hallock MF, Kenyon E, et al. Personal fluoride and solvent exposure, and their determinants, in semiconductor manufacturing. Applied Occupational Environmental Hygiene 2000;15:354-361 (<https://doi.org/10.1080/104732200301476>)

<저자정보>

김준범(연구위원), 정은교(선임연구위원), 정기효(교수)