



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 박 사 학 위 논 문

LCD 제조공정의 방사선 노출특성 연구

A Study on the Ionizing and Non-ionizing
radiation Exposure Characteristics in LCD
Manufacturing Process

울산대학교 대학원

안전보건전문학과

김 준 범

LCD 제조공정의 방사선 노출특성 연구

지도교수 정 기 효

이 논문을 공학박사학위 논문으로 제출함

2022년 8월

울산대학교 대학원
안전보건전문학과
김 준 범

김준범의 공학박사학위 논문을
인준함

심사위원 : 박 창 권 
심사위원 : 장 길 상 
심사위원 : 황 규 선 
심사위원 : 김 승 원 
심사위원 : 정 기 효 

울산대학교 대학원
2022년 8월

국문요약

LCD 제조공정의 방사선 노출특성 연구

울산대학교 일반대학원

안전보건전문학과

김 준 범

우리나라 전자산업은 급속도로 발전하고 있으며, 대표적인 전자산업 중 하나인 LCD(liquid crystal display) 제조업의 주요한 유해요인인 방사선은 근로자의 백혈병과 관련이 있는 것으로 보고되고 있다. 본 연구의 목적은 LCD 제조 공정의 연 X-선 정전기 제거장치(이온화 장치)로부터 발생하는 전리방사선 지역노출특성 및 공정 중 다양한 전자기장 발생장치로부터 발생하는 비전리방사선(극저주파자기장) 노출특성을 파악하는데 있다.

국내 2개 LCD 제조사 가공(fabrication)라인 각 2개소와 모듈(module)라인 각 1개소를 대상으로 전리방사선과 극저주파자기장 노출수준을 측정하고 평가하였다. 다만 2개 사업장 중 1개 사업장은 모듈라인에서 정전기제거를 위해 이온화 장치를 사용하지 않고 코로나 방전을 이용한 이온바를 정전기 제거장치로 사용하여 모듈라인에서 발생하는 전리방사선은 이온화 장치를 사용하는 1개소만 측정하였다.

LCD 제조공정의 장비들에 설치된 이온화 장치의 개수는 1개에서 최대 64개 까지 다양하였다. LCD 제조공정 이온화 장치로부터 발생하는 전리방사선 지역노출량은 직독식 장비를 사용하여 장비 표면 또는 장비 차폐물 표면에서 측정하였다. 또한 측정 결과는 연간 유효선량기준과 비교하기 위하여 근로자들의 방사선 노출시간을 고려한 연간 방사선량으로 환산하였다.

LCD 제조공정의 전자기장 발생장치로부터 발생하는 극저주파자기장에 대해서는 개인 노출수준과 지역 노출수준을 모두 평가 하였다. 개인 노출수준 평가를 위해서 근로자 작업시간 동안 장비를 근로자에게 착용시켜 측정하고, 장비에 저장된 데이터를 다운받아 분석하였다. 지역 노출량은 직독식 장비를 사용하여 기본적으로는 장비 표면 또는 차폐물 표면의 약 3 cm 거리에서 측정하였으며, 3 cm 거리에서의 극저주파자기장 측정값이 주변보다 다소 높은 일부 장비에 대해서는 10 cm 또는 30 cm 떨어진 거리에서 추가 측정하였다. 전리방사선 및 극저주파자기장 측정 결과를 통해 근로자 노출특성 및 장비에 따른 지역노출 특성을 파악하기 위하여 통계적 분석이 수행되었다.

장비로부터 발생하는 연간 방사선량 평가 결과 1 mSv를 초과하지 않는 평가 결과가 97.59 %를 차지했다. 그러나 전체 연간 방사선량 평가 결과의 범위는 0.004 mSv ~ 2.167 mSv로 장비별 방사선 발생량에는 큰 차이가 있는 것으로 판단된다. 통계적 분석 결과 장비별로 방사선 발생량의 차이가 큰 것은 장비 자체의 특성보다는 부적절한 차폐 등이 원인인 것으로 판단된다. 좀 더 세밀하게 이러한 차이를 파악하기 위하여 연간 방사선량이 1 mSv 이상인 장비에 대해 완전 차폐 및 차폐물의 두께 강화 등 개선 대책을 실시한 결과 개선 전 평균 연간 방사선량이 1.604 mSv에서 개선 후 0.126 mSv로 감소하였다. 방사선 감소 대책 시행 전 가장 높은 연간 방사선량은 2.167 mSv로 원자력안전법의 연간 유효선량 기준인 연간 50 mSv 이하, 5년간 100 mSv 이하(연평균 20 mSv)를 초과하지 않았다.

LCD 제조 공정 장비에서 발생하는 극저주파자기장에 노출되는 근로자들의 개인 노출수준은 측정결과 값의 최댓값 기준과 평균값 기준으로 구분하여 분석하였다. 근로자들의 작업시간 동안의 개인 평균노출수준은 0.565 μ T(SE = 0.015)로 나타났으며, 측정 결과 값의 최댓값을 기준으로 한 개인 최대 노출수준의 평균은 6.311 μ T(SE = 0.754), 노출수준의 범위는 0.5 μ T ~ 43.5 μ T로 측정되었다. 가장 높은 극저주파자기장 노출수준인 43.5 μ T는 ACGIH 노출기준인 1 mT의 4.35 % 수준이었다. 직무에 따른 극저주파자기장 개인 최대 노출수준은 엔지니어가 오퍼레이터에 비해 통계적으로 유의하게 높은 것으로 분석되었는데, 이는 오퍼레이터보다 엔지니어가 수리 등을 위해 장비 인근에 상대적으로 오래 머물면서 작업하기 때문인 것으로 추정된다. 극저주파자기장 지역노출량의 평균은 8.183 μ T(SE = 0.517)로 분석되었다. 총 16종의 장비 및 부대설비에 대한 극저주파자기장 노출수준 측정 결과 천장 레일(287.20 μ T)과 배전반(72.72 μ T)에서 가장 높은 극저주파자기장이 발생하였으며, 이는 ACGIH 노출기준인 1 mT의 약 28.72 %와 7.27 % 수준인 것으로 파악되었다. 본 연구에서는 측정 거리에 따른 지역노출량의 변화를 확인하고자 일부 장비에 대해서는 3 cm, 10 cm, 30 cm 거리에서 극저주파자기장 노출량을 측정하였으며, 평균 노출량은 각각 53.274 μ T, 4.916 μ T, 1.346 μ T로 발생원으로부터 거리가 멀어질수록 극저주파자기장이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 방사선 발생 수준이 다른 장비에 비해 다소 높게 평가 된 장비는 차폐가 완벽히 되지 않았거나, 차폐재의 두께가 불충분하다는 것을 알 수 있었다. 이는 장비에 대한 충분한 차폐가 방사선 노출수준을 감소시키기 위한 사업장에서 활용할 수 있는 중요한 공학적 개선대책임을 의미한다. 또한, 극저주파자기장 지역 노출수준은 전자기장 발생장비로부터 거리가 멀어짐에 따라 노출수준이 급격히 감소함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구결과 LCD 제조 공정의 장비로부터 발생하는 극저주파자기장은 노출기준을 초과하지는 않았지만, 근로자 건강보호를 위해서는 근로자들을 극저주파자기장 발생 장비로부터 가능한 한 멀리 떨어진 위치에서 작업하도록 하는 것을 권장한다.

Key words: LCD 제조 공정, 이온화 장치, 방사선, 극저주파자기장, 노출 수준

목 차

국문요약	i
표차례	v
그림차례	vii
I. 서 론	1
1.1. 연구배경	2
1.2. 연구목적	4
1.3. 연구의의	4
1.4. 논문구성	5
II. 문헌고찰	6
2.1. 방사선의 특성	7
2.2. 방사선의 유해성	8
2.3. 방사선 기준	10
III. 연구대상 및 방법	14
3.1. 연구 대상	15
3.1.1. 연구대상 사업장 및 공정	15
3.1.2. LCD 공정 개요	15
3.1.3. 연구대상 유해인자	17

3.2. 연구 방법	20
3.2.1. 측정 방법	20
3.2.2. 데이터 처리 및 평가 방법	22
IV. 연구 결과	25
4.1. 전리방사선 노출수준 평가 결과	26
4.1.1. 전리방사선 개인노출수준	26
4.1.2. 전리방사선 지역노출특성	27
4.2. 비전리방사선(극저주파자기장) 노출수준 평가 결과	37
4.2.1. 극저주파자기장 개인 최대노출수준	37
4.2.2. 극저주파자기장 개인 평균노출수준	43
4.2.3. 극저주파자기장 지역노출특성	48
V. 고찰	55
5.1. 전리방사선 노출특성에 대한 고찰	56
5.2. 극저주파자기장 노출특성에 대한 고찰	59
VI. 결 론	63
참고문헌	66
Abstract	70

〈표 차례〉

표Ⅱ-1. 원자력안전법 선량한도	11
표Ⅱ-2. 일반인에 대한 전자파강도기준	12
표Ⅱ-3. 직업인에 대한 전자파강도기준	12
표Ⅲ-1. LCD 제조공정 분류	16
표Ⅲ-2. LCD 제조 공정의 이온화 장치 사용 장비 기본 정보	18
표Ⅲ-3. LCD 제조 공정의 극저주파자기장 발생 장비 기본 정보	19
표Ⅳ-1. 전리방사선 개인노출수준	26
표Ⅳ-2. 사업장별 전리방사선 지역노출특성	27
표Ⅳ-3. 사업장(가공라인)별 전리방사선 지역노출특성	28
표Ⅳ-4. 사업장 라인별 전리방사선 지역노출특성	29
표Ⅳ-5. 생산 라인별 전리방사선 지역노출특성	30
표Ⅳ-6. 공정별 전리방사선 지역노출특성	31
표Ⅳ-7. 장비별 전리방사선 지역노출특성	32
표Ⅳ-8. 이온화 장치 개수에 따른 표변방사선량률	35
표Ⅳ-9. 사업장별 극저주파자기장 개인 최대노출수준	37
표Ⅳ-10. 사업장 라인별 극저주파자기장 개인 최대노출수준	38
표Ⅳ-11. 생산 라인별 극저주파자기장 개인 최대노출수준	39
표Ⅳ-12. 공정별 극저주파자기장 개인 최대노출수준	40
표Ⅳ-13. 직무별 극저주파자기장 개인 최대노출수준	41
표Ⅳ-14. 사업장별 극저주파자기장 개인 평균노출수준	43
표Ⅳ-15. 사업장 라인별 극저주파자기장 개인 평균노출수준	44
표Ⅳ-16. 생산 라인별 극저주파자기장 개인 평균노출수준	45
표Ⅳ-17. 공정별 극저주파자기장 개인 평균노출수준	46
표Ⅳ-18. 직무별 극저주파자기장 개인 평균노출수준	47
표Ⅳ-19. 사업장별 극저주파자기장 지역노출특성	48

표Ⅳ-20. 사업장 라인별 극저주파자기장 지역노출특성	49
표Ⅳ-21. 생산 라인별 극저주파자기장 지역노출특성	50
표Ⅳ-22. 공정별 극저주파자기장 지역노출특성	51
표Ⅳ-23. 장비별 극저주파자기장 지역노출특성	52

〈그림 차례〉

그림 II-1. 전자기 스펙트럼	7
그림 II-2. 방사선 피폭 후 암발병의 시간분포 특성	9
그림 IV-1. 사업장별 전리방사선 지역노출특성	27
그림 IV-2. 사업장 라인별 전리방사선 지역노출특성	29
그림 IV-3. 생산 라인별 전리방사선 지역노출특성	30
그림 IV-4. 공정별 전리방사선 지역노출특성	31
그림 IV-5. 장비별 전리방사선 지역노출특성	33
그림 IV-6. 전리방사선 감소대책 시행 전후 연간 방사선량 비교	34
그림 IV-7. 이온화 장치 개수와 표면방사선량을 상관관계	36
그림 IV-8. 사업장별 극저주파자기장 개인 최대노출수준	38
그림 IV-9. 사업장 라인별 극저주파자기장 개인 최대노출수준	39
그림 IV-10. 생산 라인별 극저주파자기장 개인 최대노출수준	40
그림 IV-11. 공정별 극저주파자기장 개인 최대노출수준	41
그림 IV-12. 직무별 극저주파자기장 개인 최대노출수준	41
그림 IV-13. 작업시간 동안 근로자 극저주파자기장 노출 패턴	42
그림 IV-14. 사업장별 극저주파자기장 개인 평균노출수준	43
그림 IV-15. 사업장 라인별 극저주파자기장 개인 평균노출수준	44
그림 IV-16. 생산 라인별 극저주파자기장 개인 평균노출수준	45
그림 IV-17. 공정별 극저주파자기장 개인 평균노출수준	46
그림 IV-18. 직무별 극저주파자기장 개인 평균노출수준	47
그림 IV-19. 사업장별 극저주파자기장 지역노출특성	48
그림 IV-20. 사업장 라인별 극저주파자기장 지역노출특성	49
그림 IV-21. 생산 라인별 극저주파자기장 지역노출특성	50
그림 IV-22. 공정별 극저주파자기장 지역노출특성	51
그림 IV-23. 장비별 극저주파자기장 지역노출특성	53

그림 IV-24. 측정 거리에 따른 극저주파자기장 노출량	54
그림 V-1. 차폐 재질 및 두께에 따른 차폐 효율	58

I. 서론

1.1. 연구배경

우리나라 전자산업은 급속도로 발전하고 있으며, 제조공정의 규모 또한 대형화되고 있다. 대표적 전자산업은 반도체, LCD(liquid crystal display) 제조업 등이 있다. 2010년을 전후 하여 반도체 제조공정 근로자 백혈병 발생이 사회적으로 큰 이슈가 되어 반도체 제조업에 대한 역학조사와 관련연구들 통해 공정 중 사용하는 화학물질 및 전리·비전리방사선이 반도체 공정의 주요 유해요인임이 보고되었다(박승현 등, 2012). LCD 제조공정은 반도체 제조공정과 유사한 작업환경을 보유하고 있으며 전리방사선 및 비전리방사선 등 유해인자가 있다(김기웅 등, 2016).

법원과 근로복지공단이 반도체 제조공정 종사근로자(LCD 제조공정 종사근로자 포함)의 질병을 업무상질병으로 처음 판결·인정한 2011년 6월부터 2018년 6월 까지 총 28명의 질환이 산업재해로 인정되었다. 인정사례 질병 중 백혈병이 8명으로 가장 많았으며, 이 중 5명의 산업재해 주요인정 근거는 화학물질과 방사선 복합노출이 었다. 방사선 노출이 산업재해의 인정근거가 된 5명 중 4명은 반도체 제조공정 종사근로자로 화학물질과 전리방사선에 노출되었고, 나머지 한명은 LCD 제조공정 종사근로자로 화학물질과 전리·비전리방사선에 노출되었다(손미아 등, 2018).

LCD 제조공정에서 전리방사선을 발생시킬 수 있는 장비는 X선을 이용한 정전기 제거장치(이온화 장치)이다. 미세 먼지가 정전기로 인해 LCD 패널에 부착되면 제품 불량 발생하기 때문에 이를 방지하기 위해 LCD 제조 공정에는 정전기 제거장치가 사용된다. 과거에는 정전기 제거장치로 코로나방전 원리를 이용한 이온바(ion bar), 이온 블로워(ion blower)가 사용되었으나 최근에는 투과력이 0.12 ~ 12 kV인 연 X선(soft X-ray)을 이용한 장치가 주로 사용되고 있다(정필훈 & 이동훈, 2016; 정은교 등, 2017). 정전기 제거장치에서 발생하는 방사선 관련 연구는 정전기 제거 장치의 효율 향상을 위한 연구 과정에서 방사선 발생 수준을 측정하여 보고한 바 있으나(정필훈 & 이동훈, 2016), 근로자의 건강보호를 위한 연구는 부족한 실정이다.

LCD 제조공정 이온화 장치에서 발생하는 방사선에 대해서는 원자력안전법 시행령에 따라 오염상황 측정(제 131조), 건강진단(제 32조), 피폭선량 평가 및 피폭관리(제 133조)를 할 의무가 있다(원자력안전위원회, 2021). 동 법에 따라 LCD 제조 사업장에서도 피폭선량 평가를 위해 개선선량계를 활용해 근로자 누적 노출 방사선량을 측정하고 있었다. 개인 피폭선량은 3개월 단위로 선량계에 누적된 피폭선량을 판독하여 원자력안전법의 연간 유효선량 기준과 비교하고 있어 근로자 개인 피폭수준 관리에는 효과적이다. 그러나 기존 연구에 따르면 방사선발생장치 정비 후 이음새가 견고하지 못해 발생한 틈 등에서 일시적으로 높은 방사선이 누출된다는 보고(박승현 등, 2012)가 있으나, 개인선량계로 측정된 결과로는 공정 중 방사선 발생 수준이 높은 장비 및 작업지역을 파악하여 작업환경을 개선하기에는 제약이 있다. 따라서 LCD 제조공정 장비에서 발생하는 방사선노출 특성 파악과 근로자 건강보호를

위한 작업환경 개선 대책 수립을 위해서는 개인노출 수준 측정보다 방사선 지역노출수준을 측정하고 평가하는 연구가 필요하다.

비전리방사선 중 하나인 극저주파자기장(extremely low frequency magnetic field; ELF-MF)은 소아 백혈병과 관련이 있다고 알려지면서 그 발암성이 주목받기 시작했으나(Izabe et al., 2009) 건강유해성에 대해서는 논란이 있다. ICNIRP(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 1998) 연구 등에서는 83.3 μT (ICNIRP 가이드라인의 60 Hz에서의 일반인 노출기준) 이하 수준의 극저주파자기장에 노출 될 경우 극저주파자기장과 건강영향 관련성에 대한 명확한 결론을 내지 못했다.

한편, 극저주파자기장과 소아 백혈병 연관성에 대한 역학연구 결과 등에서 극저주파자기장 노출 수준이 평균 0.3 ~ 0.4 μT 이상인 소아의 경우 백혈병 발생위험이 높다(ICNIRP, 1998. Repacholi, 2021)는 보고와 송전선로에서 200 m 내에 사는 아동의 백혈병 위험도가 증가한다는 보고가 있었다(Draper et al., 2005). 소아뿐만 아니라 성인도 송전선로 50 m 내에 사는 경우 300 m 밖에 사는 사람보다 백혈병 발생 위험이 높다는 보고가 있었다(Lowenthal et al., 2007). 이러한 연구결과를 고려하여 2002년 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(IARC)에서는 극저주파자기장을 인체 발암 가능 물질인 2B 등급으로 분류하였다(IARC, 2021).

사업장 근로자들도 사업장에서 사용하는 전기기기, 장비와 전력공급 장치로부터 발생하는 자기장에 노출된다. 용접공은 0.95 μT (median)의 극저주파자기장에 노출되는 것으로 보고되었으며(NIEHS/NIS, 2002), 다른 연구에 따르면 용접작업 근로자는 3.46 μT 수준의 극저주파자기장에 노출되는 것으로 보고되었다(정은교 등, 2012). 전기 작업자, 재봉틀 작업자, 방직기계 작업자 등 제조업 종사 근로자뿐만 아니라 제빵사, 계산원, 조리사도 평균 0.23 μT 이상의 극저주파자기장에 노출되는 것으로 파악되었다(Deadman & Infante-Rivard, 2002). 사무실도 극저주파자기장이 발생하는데 노출수준은 0.05 ~ 0.4 μT 로 가정의 극저주파자기장 노출수준과 유사하지만, 특정 장비에서는 노출수준이 간헐적으로 급증한다는 보고도 있다(NIEHS/NIS, 2002).

LCD 제조공정은 다른 제조업에 비해 분석 장비 및 초정밀 기기 등이 집약적으로 설치된 일괄 공정이고, 고전압과 고전류를 사용하는 대형 설비로 인해 전자기장 발생이 문제 될 수 있다. 비록 극저주파자기장으로 인한 건강 관련성에 대해서는 이견이 있지만 근로자 건강보호를 위해서는 사업장에서 발생하는 극저주파자기장 노출수준을 파악하고 관리하는 것이 필요하다.

1.2. 연구목적

본 연구의 목적은 전자산업 중 LCD 제조공정에서의 백혈병을 유발할 수 있는 물리적 유해인자인 전리방사선과 비전리방사선 노출특성을 파악하여 LCD 제조공정의 전리방사선 및 비전리방사선의 통제 및 관리를 통해 근로자 건강을 보호하는 기초자료를 확보하는데 있다. 이를 위해 국내 2개의 LCD 제조사업장의 제조공정에서 발생하는 전리방사선 및 비전리방사선 노출수준을 파악하고자 하였다. 먼저, LCD 제조공정에서 정전기 제거 목적으로 연 X선 이온화 장치를 사용하는 설비에 대한 전리방사선 지역노출량을 측정한 후, 근로자 노출기준(연간 유효선량)과 비교하기 위해 근로자의 방사선 노출 빈도 및 시간 등을 고려하여 연간 방사선량을 평가하였다. 또한 LCD 제조공정의 각종 생산장비 및 고용량의 전기설비로부터 발생하는 극저주파자기장 개인노출량 및 지역노출량을 평가하였다

둘째, 측정 결과를 바탕으로 LCD 제조 공정의 전리방사선 및 비전리방사선 노출특성을 파악하기 위해 사업장, 라인, 공정, 장비 간 유의한 차이가 있는지 통계적 분석으로 분석하고, 발생량이 높게 평가된 장비에 대해서는 노출 수준이 높은 이유를 분석하였다.

셋째, 노출 수준이 높게 나타난 장비에 대해서는 발생원의 차폐 또는 발생원으로부터의 거리 이격 등의 작업경개선 대책을 시행하고 그 효과를 정량적으로 평가하여, 본 연구 결과가 LCD 제조공정 전리방사선 및 비전리방사선의 효과적 통제 및 관리에 활용될 수 있도록 기초자료를 마련하고자 하였다.

1.3. 연구의의

본 연구는 국내에서 활발히 연구되지 않은 전자산업 특히 LCD 제조 공정의 근로자 전리방사선 및 비전리방사선의 노출수준을 평가한 자료로서 그 의의가 있다. 그리고 전리방사선 및 극저주파자기장 노출 실태를 파악하고, 노출 수준이 상대적으로 높은 장비에 대한 개선대책의 효과를 분석함으로써 본 연구결과는 근로자 건강 보호를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

마지막으로 LCD 제조업은 첨단 산업으로 급속한 기술발전과 효율성 등을 고려하여 효율성이 떨어지는 라인은 폐쇄하거나, 사업자체를 철수 하는 경향이 있다. 본 연구의 전리방사선 및 비전리방사선 노출 수준 측정결과 역시, 향후 폐쇄될 수 있는 사업장 및 생산라인의 과거 노출 수준을 확인 할 수 있는 기초자료로 역학조사 등에 활용할 수 있을 것이라 기대한다.

1.4. 논문구성

본 논문은 총 6장으로 구성되었다. 제1장은 연구배경, 목적, 연구의의 및 논문구성 항목으로 이루어진 서론이다. 제2장은 방사선에 대한 국내외 연구내용을 분석하였다. 제3장은 연구 대상인 LCD 제조공정에 대한 설명 및 전리방사선 및 비전리방사선 측정·분석 방법을 정리하였다. 제4장은 LCD 제조공정의 전리방사선 및 비전리방사선 측정·평가 결과를 정리하였고 제5장에서는 그 의미를 분석하고 향후과제를 제안하였다. 마지막 결론에서는 본 논문에서 도출한 주요결과를 기술하였다.

II. 문헌고찰

2.1. 방사선의 특성

방사선은 우주 공간, 암석과 토양 등에서 자연적으로 발생하는 자연 방사선과 의료분야, 산업현장 등에서 특정한 목적을 위해 생성한 인공방사선으로 구분할 수 있다. 방사선은 과거 원자력 발전소 등 특수한 분야에서 노출될 수 있는 것으로 인식되었으나, 침대 매트리스 및 건축자재 등에서 발생한 라돈 노출사건, 북극항로를 운항하는 항공기 탑승 승무원의 방사선 피폭 문제 등이 언론에 보도되면서 방사선에 대한 일반인들의 관심도 커지고 있다.

방사선은 넓은 의미에서는 입자·파동이 공간을 전파하는 상태를 의미하며, 좁은 의미에서는 원자 핵 붕괴 시 발생하는 모든 원자를 말한다. 방사선 크게 두 가지로 분류할 수 있는데 전리 대상 물질을 공기로 볼 때 전리 능력에 따라, 공기를 구성하는 원자를 전리할 수 있는 전리방사선과 공기를 전리할 수 없는 비전리방사선으로 분류된다. 우리가 흔히 말하는 방사선은 전리방사선을 말한다(Daniel, 1992; 김창균, 2017). 방사선은 그림 II-1과 같이 파장에 따라서 구분되며 전리방사선에는 알파선, 베타선, 엑스선, 감마선 등이 포함되며, 비전리방사선에는 적외선, 가시광선, 마이크로파(microwave, MW), 라디오파(radio frequency, RF), 초저주파(very low frequency, VLF), 극저주파(extremely low frequency, ELF) 등이 해당 된다(ICNIRP, 2020). 산업안전보건기준에 관한 규칙 제7장에서는 방사선을 ‘전자파나 입자선 중 직접 또는 간접적으로 공기를 전리하는 능력을 가진 것으로서 알파선, 중양자선, 양자선, 베타선, 그 밖의 중하전입자선, 중성자선, 감마선, 엑스선 및 5만 전자볼트 이상(엑스선 발생장치의 경우에는 5천 전자볼트 이상)의 에너지를 가진 전자선’으로 정의하고 있다(고용노동부, 2022a).

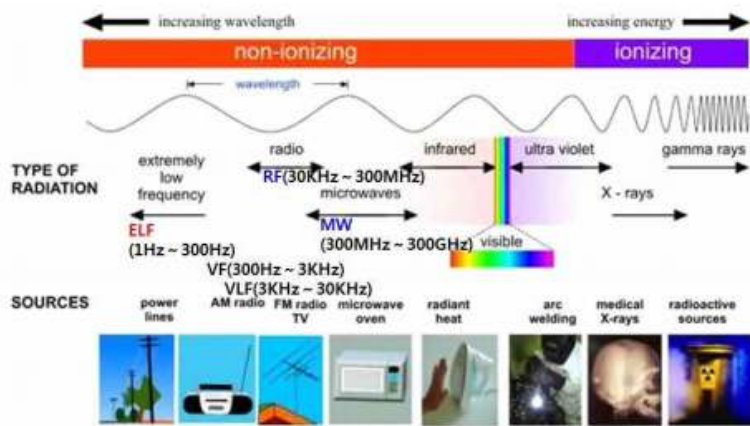


그림 II-1. 전자기 스펙트럼(정은교 등, 2017)

방사선량은 조사선량, 흡수선량, 등가선량, 유효선량 등이 사용되는데 각각의 의미와 단위는 다음과 같다.

조사선량(exposure, X)은 공기 단위 질량 당(1 cm³) 생성되는 이온의 전하량으로 단위는 쿨롱(R) 또는 C/kg이며, 방사선원의 출력을 표시한다($1R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$). 흡수선량(absorbed dose, D)은 피폭 받은 물질의 단위질량(dm)에 전리방사선이 부여한 평균에너지($d\epsilon$)로 그레이(Gy), 라드(rad) 단위($1 Gy = 100 rad$)를 사용하며, 방사선과 물질간의 상호작용과 그 영향을 정량적으로 나타내는 단위이다(문재동 등, 2003)

등가선량(equivalent dose, HT)은 방사선의 에너지와 종류에 따른 생물학적 효과의 차이를 방사선 가중치(WR)를 사용하여 보정한 양($HT = \sum DT.R$ (조직에서의 흡수선량))으로 단위는 시버트(Sv), 렘(rem)이 사용된다($1 Sv = 100 rem$). 유효선량(effective dose, E)은 조직의 등가선량에 해당 조직의 상대적인 위험도인 조직 가중치를 고려한 양으로 단위는 시버트(Sv)가 사용된다(문재동 등, 2003).

비전리방사선은 극저주파, 초저주파, 라디오파, 마이크로파, 적외선, 가시광선 등으로 구분되지만 모두 전자기파(장)의 일반적인 특성을 갖는다. 전자기장은 공간속을 일직선으로 이동 및 굴절될 수 있으며, 전달되는 에너지는 주파수에는 비례하나 파장에는 반비례한다(Cember, 1983). 또한, 비전리방사선이 물질에 충돌하면 전리방사선에 비해 주파수가 낮기 때문에 전달되는 에너지가 작아 원자핵의 이온화를 일으키는 대신 열이 발생하게 된다. 전자기장은 흔히 전자파로 불리고 있으며 전자파의 유해성은 곧 전자기장의 유해성을 의미한다. 전자기장은 전기와 자기의 흐름에서 발생하며 광범위한 주파수 영역을 갖는 전자기 에너지로 전기와 자기로 나누어진다. 전기장은 전압의 세기에 비례하여 발생하고 자기장은 전류의 크기에 비례하여 발생한다. 또한 전기와 자기는 성질은 다르지만 서로 결합되어 있으며 인체 영향은 전기보다는 자기에 의한 영향이 더 큰 것으로 알려져 있다. 전기는 전도성 물체에 의해 차폐되지만 자기는 거의 모든 물체를 통과하기 때문에 전기 사용 기기에서 필연적으로 발생한다(NIH, 2002).

2.2. 방사선의 유해성

전리방사선이 인체에 미치는 영향은 결정론적 영향과 확률론적 영향으로 나눌 수 있다. 결정론적 영향은 일정 수준 이상의 방사선량에 피폭되면 세포가 사멸하여 세포 기능을 상실하는 누구에게나 이상을 일으키는 영향을 말하는데 피부 손상, 불임, 백내장, 급성 방사선 증후군과 같이 일정 선량 이상의 수준에 노출되어야만 반응이 나타나는 것을 의미한다(김수근, 2006; UNSCEAR, 2010). 예를 들면 500 mSv 이상 피폭 시 백혈구 감소, 1,500 mSv 이상 피폭 시 방사선 속취, 4,000 mSv 이상 전신 조사 시 30일 내 피폭집단의 50 % 사망 또는 조혈계 장애를 일으키고, 5,000 mSv 이상 피폭 시 탈모, 7,000 mSv 이상 피폭 시 2 ~ 3주 내 피폭집단의 100 %가 사망하는 것으로 알려져 있다(한국보건의료연구원, 2011).

확률론적 영향은 세포가 사멸하지는 않지만 백혈병 등을 유발하는 암세포로 발전하거나, 생식세포 돌연변이로 유전 결함을 일으킬 수 있는 영향을 말한다. 확률론적 영향은 피폭된 사람의 나이, 성별 등 여러 요인 및 초기 돌연변이 양태에 따라 확률적으로 암 발생으로 이어진다(UNSCEAR, 2010). 방사선으로 인해 알려진 암 위험은 대부분 일본 원자폭탄의 생존자에 대한 연구나 동물실험을 기반으로 한다. 히로시마와 나가사키 원폭 피폭자 조사연구에 따르면 200 mSv 이상의 방사선에 피폭될 경우 선량이 높아지면 암 발생률이 높아진다는 것을 확인할 수 있었으며, 모든 암은 아니지만 대부분의 유형의 백혈병(만성 림프성 백혈병과 성인 T세포 백혈병 제외), 방광암, 난소암, 유방암, 폐암, 갑상선암, 결장암(직장암 제외)과 같은 암의 위험이 높아지는 것으로 나타났다. 백혈병은 피폭 후 약 2~3년 후에 나타났으나, 그림 II-2와 같이 백혈병을 제외한 고형암은 피폭 후 10년째 정도부터 시작해 증가한다(초록방사선, 2022).

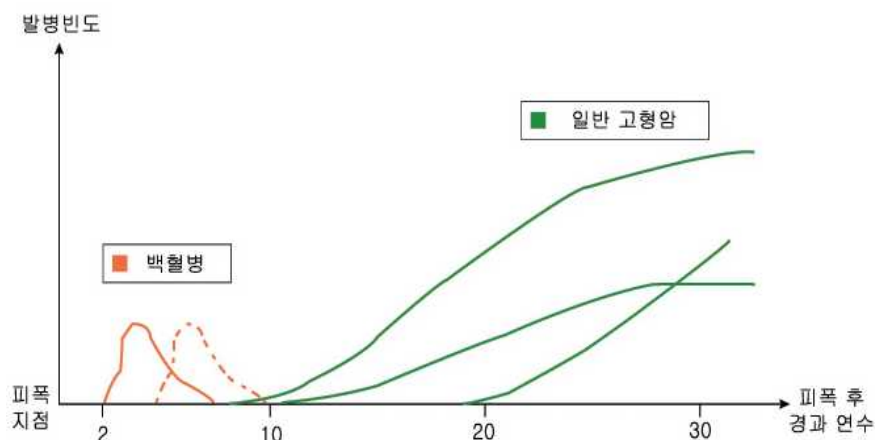


그림 II-2. 방사선 피폭 후 암발병의 시간분포 특성(초록방사선, 2022)
 <출처 : 한국방사선동위원소협회, 알기 쉬운 방사선 영향>

전리방사선 피폭에 따른 확률론적 영향은 비교적 높은 수준은 방사선에 노출되었을 경우 발생하나, 현재 까지 저선량 방사선(일반적으로 100 mSv 이하) 피폭과 암 증가에 대한 명확한 연구결과가 있지는 않지만, 전미 연구위원회 국립아카데미(National Research Council of the National Academies)의 전리방사선의 생물학적 영향(biologic effects of ionizing radiation, BEIR) VII 보고서에서는 저선량 피폭에도 암 발생 위험이 선형관계를 보이며 최소 선량에서도 암 발생에 대한 역치선량은 없다(선형 무역치 모델, LNT)는 견해를 보이며, 대부분 국제기구 보고서에서도 이러한 견해를 지지한다(도경현, 2011).

비전리방사선 중 자외선은 피부암을 일으킬 수 있는데 피부암은 햇빛의 자외선에 직접 노출될 경우 발생할 수 있다. 직업적 노출은 편평상피 세포암을 일으킬 수 있

으며, 자외선에 노출된 일부 동물의 경우 눈에 암(각막과 결막에 영향)이 발생되었다. 또한 용접 및 판금작업자의 흑색종(눈) 발생 확률이 높다는 연구 결과도 보고되었다.

라디오파(마이크로파 포함)는 실험실에서 이루어진 연구나 사람에 대한 연구 결과 라디오파의 노출이 암 발생 위험을 높인다는 명백한 증거는 발견되지 않았다. 그러나 IARC에서는 라디오파를 인간에게 발암 가능성이 있는 group 2B로 분류하였다. 라디오파의 다른 건강영향은 인체에 발열현상을 일으키는 것으로 알려져 있다(정은교 등, 2017).

극저주파자기장과 인체영향과 관련하여 전기용접공 및 전기기술자 등은 일반 근로자와 비교하면 높은 전자기장에 노출되며 이러한 근로자들은 뇌암 등 발생비율이 높은 것으로 보고되고 있으나(Deltour, 20019; Kheifets, 2001; Kheifets 등, 1999) 아직 극저주파자기장과의 연관성은 명확히 규명되지 않았다. 그리고 송전탑 주변에 거주하는 아이들의 백혈병 발생위험이 높다는 연구와 직업적 극저주파자기장 노출로 인한 백혈병 발생 가능성이 있다는 연구 등의 역학연구 사례도 있어(Li 등, 2007; Olsen 등, 1993), IARC에서는 극저주파자기장을 인체 발암 가능 물질인 2B 등급으로 분류하였다. 반면에, 높은 수준의 극저주파자기장 노출과 뇌암 등 암 발생은 관련이 없다는 연구결과도 보고되고 있다. 즉 역학연구 학자들은 아직 명확하게 극저주파자기장에 의한 생물학적 기전이 밝혀지지 않았지만, 극저주파자기장과 암발생은 관련성이 매우 높다고 주장하는 입장이지만, 동물 및 세포실험 학자들은 역학연구 방법론에 문제가 있다고 주장하고 있다. 따라서 이러한 견해의 차이는 단순히 연구대상이 다르거나 극저주파자기장 평가 방법의 차이일 수도 있고, 현재까지 밝혀지지 않은 극저주파자기장 이외 다른 원인이 암 발생에 기여했을 수도 있으므로 후속적인 광범위한 연구가 필요하다(정은교 등, 2012).

2.3. 방사선 기준

우리나라는 방사선 기준 및 방사선 안전규제 업무가 단일 기관에서 전담되지 않고, 이용 및 안전관리 분야별로 다수부처에서 분산 수행되고 있다. 원자력안전위원회는 원자력안전법에 따라 원자력시설, 방사성동위원소 등의 사용에 따른 방사선 안전관리 업무를 수행하며, 생활주변방사선 안전관리법에 따라 천연방사성물질의 생산, 유통 등에 따른 안전관리 업무를 수행한다. 고용노동부는 산업안전보건법에 따라 산업시설에서의 방사선 취급 근로자의 안전관리 업무를 담당한다. 환경부는 먹는물 관리법과 수도법에 의거 먹는 물의 방사능 기준 등 안전관리 업무를 수행하고 실내공기질 관리법에 따라 다중이용시설 실내 공기 질 안전관리 업무를 수행한다. 그리고 국토교통부는 건축법에 따라 건축자재 방사선 안전관리, 생활주변방사선 안전관리법에 따라 항공승무원 보호 업무를 수행한다. 보건복지부(질병관리청)는 의

료법에 따라 의료기관 진단용 방사선기기 안전관리 업무를 담당한다. 식약처는 식품위생법에 따라 식품 내 방사선 안전기준 관리, 의료기기법에 따라 방사선사용 의료기기의 기능 안전성 관리 업무를 수행한다. 이렇듯 여러 부처에서 업무를 수행하고 있어 피폭상황과 대상별로 일관된 안전기준이 없고 분야별 적용과정에서 체계적 이행 매커니즘이 없는 실정이다. 또한 안전기준 설정근거가 불명확 해 동일한 피폭 상황임에도 부처별로 안전기준이 불일치하거나 국제기구 권고와는 다르게 적용되는 경우도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 국가방사선방호종합계획 근거 마련을 위한 방사선방호 기본법이 국회에 발의되었으며(2021년) 현재 범부처간 협의를 진행 중에 있다. 주요 내용으로는 방사선 방호 기본원칙과 기준을 제시하는 등의 내용을 담고 있다.

대부분 국가는 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)의 방사선 방호기준을 따르고 있다. 우리나라, 미국, 프랑스, 독일, 영국, 일본 등의 나라에서는 ICPR에서 발간한 가이드라인 기준으로 각 국가 상황에 따라 수정하여 법령과 기준을 수립하고 있다(류권홍, 2017). 우리나라도 ICRP 기준을 준용하여 원자력안전법의 방사선방호 등에 관한 기준에서 표 II-1과 같이 ‘방사선 종사자는 연간 50 mSv 이하, 5년간 100 mSv 이하, 수시출입자 및 운반종사자는 연간 6 mSv 이하 그 외 종사자는 연간 1 mSv 이하’를 방사선 노출 기준으로 정하였다(원자력안전위원회 2021).

표 II-1. 원자력안전법 선량한도(원자력안전위원회, 2021)

(단위 : mSv)

구분	유효선량한도	등가선량한도	
		수정제	손·발 및 피부
1. 방사선작업종사자	연간 50을 넘지 않는 범위에서 5년간 100	연간 150	연간 500
2. 수시출입자, 운반종사자 및 법 제96조 단서에 따라 교육훈련 등의 목적으로 위원회가 인정한 18세 미만인 사람	연간 6	연간 15	연간 50
3. 제1호 및 제2호 외의 사람	연간 1	연간 15	연간 50

우리나라 비전리방사선 중 극저주파자기장 강도기준은 과학기술정보통신부의 ‘전자파인체보호기준’에서 표 II-2와 표 II-3과 정하고 있으며, 이 기준에 따르면 60 Hz에서는 일반인 83.3 μT (5/f, f=60 Hz), 직업인 416.7 μT (25/f, f=60 Hz)로 노출기준을 제시하고 있다(과학기술정보통신부, 2017).

표 II-2. 일반인에 대한 전자과장도기준(과학기술정보통신부, 2017)

주파수 범위	전기장강도 (V/m)	자기장강도 (A/m)	자속밀도 (μT)	전력밀도 (W/m^2)
1 Hz 이하	-	3.2×10^4	4×10^4	
1 Hz 이상 ~ 8 Hz 미만	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	
8 Hz 이상 ~ 25 Hz 미만	10,000	$4,000/f$	$5,000/f$	
0.025 kHz 이상 ~ 0.8 kHz 미만	$250/f$	$4/f$	$5/f$	
0.8 kHz 이상 ~ 3 kHz 미만	$250/f$	5	6.25	
3 kHz 이상 ~ 150 kHz 미만	87	5	6.25	
0.15 MHz 이상 ~ 1 MHz 미만	87	$0.73/f$	$0.92/f$	
1 MHz 미만 ~ 10 MHz 미만	$87f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$	
10 MHz 이상 ~ 400 MHz 미만	28	0.073	0.092	2
400 MHz 이상 ~ 2,000 MHz 미만	$1,375f^{1/2}$	$0.0037/f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$	$f/200$
2 GHz 이상 ~ 300 MHz 미만	61	0.16	0.20	10

* 주파수(f)의 단위는 주파수 범위란에 표시된 단위와 같고 60 Hz 주파수대역의 전기설비(송전선로)는 이 기준을 적용하지 아니한다.

표 II-3. 직업인에 대한 전자과장도기준(과학기술정보통신부, 2017)

주파수 범위	전기장강도 (V/m)	자기장강도 (A/m)	자속밀도 (μT)	전력밀도 (W/m^2)
1 Hz 이하	-	1.63×10^5	2×10^5	
1 Hz 이상 ~ 8 Hz 미만	20,000	$1.63 \times 10^5/f^2$	$2 \times 10^5/f^2$	
8 Hz 이상 ~ 25 Hz 미만	20,000	$2 \times 10^4/f$	$2.5 \times 10^4/f$	
0.025 kHz 이상 ~ 0.82 kHz 미만	$500/f$	20f	25/f	
0.82 kHz 이상 ~ 65 kHz 미만	610	24.4	30.7	
0.065 MHz 이상 ~ 1 MHz 미만	610	$1.6/f$	$2.0/f$	
1 MHz 미만 ~ 10 MHz 미만	$610/f$	$1.6/f$	$2.0/f$	
10 MHz 이상 ~ 400 MHz 미만	61	0.16	0.2	10
400 MHz 이상 ~ 2,000 MHz 미만	$3f^{1/2}$	$0.008f^{1/2}$	$0.01f^{1/2}$	$f/40$
2 GHz 이상 ~ 300 MHz 미만	137	0.36	0.45	50

* 주파수(f)의 단위는 주파수 범위란에 표시된 단위와 같고 60 Hz 주파수대역의 전기설비(송전선로)는 이 기준을 적용하지 아니한다.

이는 국제비전리복사방호위원회(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP) 기준(ICNIRP, 1998)과 동일하다. 한편 2010년 ICNIRP는 0.06 kHz에서 직업인 극저주파자기장 노출기준을 1,000 μ T(1 mT), 일반인 노출기준을 200 μ T로 명시하였다(ICNIRP, 2010). 영국, 독일, 스페인, 핀란드, 스웨덴, 호주, 뉴질랜드 등은 ICNIRP(2010)와 동일한 기준을 준용하고 있다(신영진 등, 2016).

우리나라 전자파 측정 관련 기준은 국립전파연구원 고시 제2017-7호(2017.8.4.)에서 정하고 있으며, 주요 내용은 전자기장 측정은 전자가장 노출 대상이 접근할 수 있는 모든 장소에서 측정해야 하며 노출 조건이 여러 개 있는 경우 최악의 노출 조건을 선택하도록 하고 있다. 그리고 저주파 전자기장 측정은 3축 등방성프로브를 사용하여 합성전자기장의 최댓값을 측정하도록 하고 있다(국립전파연구원, 2017).

Ⅲ. 연구대상 및 방법

3.1. 연구대상

3.1.1. 연구대상 사업장 및 공정

LCD 제조공정은 크게 박막트랜지스터(thin-film transistor, TFT) 기판과 다양한 색을 낼 수 있는 컬러필터(color filter, CF) 기판에 설계패턴을 완성하고, TFT와 CF 사이에 액정(liquid crystal, LC)을 주입 후 합착하는 가공(fabrication, Fab) 공정과 광원인 백라이트(back light)와 편광판 등을 부착하고 조립하는 모듈(module) 공정으로 나눌 수 있다(김기웅 등, 2016).

연구는 국내 LCD 제조시장을 양분하고 있는 2개의 회사(이하 A사, B사)의 TFT-LCD 생산라인을 대상으로 하였다. A사와 B사 모두 1990년대 중반부터 LCD 생산 공정(라인)을 가동하였으나, 전자산업의 급속한 발전으로 생산성 등을 고려하여 초기 생산라인은 더 이상 가동하지 않고 정리해, 연구 시점에서 A사의 경우 1998년, B사의 경우 2002년에 양산을 시작한 공정이 가장 오래된 가공 공정이었다. A사와 B사 모두 가장 오랜 된 가공공정에서는 mobile이나 tablet 등 비교적 소형 디스플레이를 생산했으나, 2000년도 중반 이후 양산을 시작한 가공공정에서는 mobile, tablet을 포함한 TV용 디스플레이 등 상대적으로 큰 디스플레이를 생산하였다.

이번 연구는 A사와 B사의 가장 오래된 가공라인 각 1개(이하 A-1, B-1)와 2000년대 가동을 시작하여 연구시점까지 활발하게 가동 중인 가공라인 각 1개(이하 A-2, B-2)와 이 두 개의 가공라인에서 생산된 제품에 편광판과 광원 등을 부착하여 최종 조립하는 모듈라인 각 1개(이하 A-3, B-3)를 연구대상을 하였다.

3.1.2. LCD 공정 개요

액정 디스플레이의 핵심 소재는 액정인데 LCD의 기본 원리는 빛의 방향성에 있다. 원리는 광원(백라이트)에 일정한 방향성을 주어(편광판) 광원에서 발생된 빛이 액정을 지나가도록 하고, 전류를 이용해 액정의 움직임에 따라 빛의 방향(각도)을 조절하여 빛의 양을 조절하는 원리이다.

LCD 제조공정은 크게 가공공정인 TFT제작(TFT 공정), 컬러필터 제작(CF 공정), 합착/셀/액정 주입(LC 또는 cell 공정)과 조립공정인 모듈공정(module 공정)의 4단계의 주 공정으로 분류 되며, 세부공정은 표Ⅲ-1과 같다.

표Ⅲ-1. LCD 제조공정 분류 (김기웅 등, 2016)

생산라인	주 공정	세부 공정
가공라인 (fab)	TFT	세정
		증착
		포토
		식각
	컬러필터(CF)	박리
		세정
		증착
		포토
	액정(LC)	세정
		배향(PI)
러빙(rubbing)		
액정주입		
모듈라인 (module)	모듈(module)	후공정
		세정
		편광판 부착
		PCB 부착
		조립
		검사

TFT 공정은 세정공정을 통해 유리 위에 묻은 이물질을 제거하고, 물리적 방법(sputter 공정) 및 화학적 방법(chemical vapor deposition, CVD 공정)으로 유리기판 위에 박막을 형성시키는 증착공정을 거친다. 다음으로 설계된 회로패턴을 유리기판에 구현하는 포토공정, 원하는 설계패턴을 완성하기 위해 증착된 표면을 부식시켜 제거하는 식각 공정, 식각 후 유리기판에 잔류하는 성분을 제거하는 박리공정(strip)으로 구성된다(김기웅 등, 2016). CF 공정은 TFT 공정과 유사한 세정, 증착, 포토공정으로 구성된다.

LC 공정은 TFT 공정과 CF 공정에서 가공된 유리기판에 폴리이미드(polyimide, PI) 배향막을 인쇄하고, 러빙포가 감겨 있는 롤러에 배향막이 인쇄된 유리기판을 통과시켜 표면에 골을 만들어(rubbing) 원활한 액정 구동방향 및 각도를 형성하고, 액정을 주입(vacuum alignment with liquid crystal process, VALC 또는 vacuum alignment system, VAS)한 후 TFT와 CF 유리기판을 합착한다. 이때 액정이 새는 것을 방지하기 위하여 보통 CF 기판에는 실런트(sealant)를 도포하고 액정은 TFT 기판에 적하하는데, 실런트 도포를 통해 두 유리기판 사이의 간격을 형성시키는 역할도 하여 동 공정은 GAP 또는 ODF(one drop filling)라고도 불린다(김기웅 등, 2016).

모듈 공정은 LC 공정에서 액정을 주입하고 합착한 후 절단된 패널에 편광판(polarizer) 부착, 인쇄회로기판(printed circuit board)과 백라이트(back light unit, BLU)를 연결하여 단위 부품을 하나의 LCD 모듈로 만든 후 최종 검사하는 공정이다(김기웅 등, 2016).

3.1.3. 연구대상 유해인자

LCD 제조공정에서 유리기판의 정전기 제거를 위해 사용하는 정전기 제거장치(ionizer)에서 발생하는 전리방사선(X선)과 각종 전자기장 발생장치(생산 장비, 고용량 전기설비 등)에서 발생하는 비전리방사선(극저주파자기장)에 대한 근로자 노출수준을 평가하여 근로자의 방사선 노출특성을 연구하였다.

3.1.3.1. 전리방사선

사업장에서 사용하는 연 X선 이온화 장치는 국산 1종(전압 9.5 kV, 최대전류 0.15 mA)과 일본 제품 1종(전압 11 kV, 최대전류 0.28 mA)이었고, 두 제품의 성능차이는 없는 것으로 파악되었다. 다만 이온화 장치의 수명은 약 1년 ~ 1년 반 정도인데 일본제품은 제품 수명의 70 ~ 80 %를 사용하면 알람기능이 작동하여 생산에 차질 없이 제품을 교체할 수 있으나, 국내 생산품은 별도의 알람 기능이 없는 것으로 파악되었다.

본 연구는 두 개 사업장 각 가공라인 2개소에서 정전기 제거장치에서 발생하는 전리방사선을 측정하였고, 모듈라인은 B사의 모듈라인에서만 전리방사선을 측정하였다. A사와 B사 모두 가공라인에서는 정전기 제거를 위해 연 X선을 이용한 이온화 장치를 사용하였으나, 모듈라인의 경우 B사는 이온화 장치를 사용하였고 A사는 코로나 방전을 이용한 이온바를 정전기 제거장치로 사용하여 모듈라인은 B사만 측정대상으로 하였다.

이온화 장치를 사용하는 공정 및 장비는 III-1과 같으며, 각 장비에 사용된 이온화 장치는 최소 1개에서 최대 64개까지 다양한 것으로 파악되었다.

표Ⅲ-2. LCD 제조 공정의 이온화 장치 사용 장비 기본 정보 (김준범 등, 2021)

사업장	사업장 라인	주공정	세부공정	이온화 장치 사용 장비	장비수	장비에 설치된 이온화 장치 수
A	A-1 (fab)	TFT	photo	stepper	1	1
					3	2
					2	3
					1	4
					4	1
					1	3
					1	2
					3	3
					3	5
					2	2
	A-2 (fab)	TFT	photo	coater	1	8
					1	10
					3	4
					1	6
					2	2
					1	4
					2	7
					1	10
					2	4
					3	1
B-1 (fab)	CF	photo	stepper	1	1	
				2	2	
				2	2	
				1	9	
				1	33	
				1	41	
				1	1	
				3	2	
				6	2	
				1	1	
B	B-2 (fab)	LC	filling	one drop filling	2	2
					1	3
					1	4
					3	5
					1	6
					1	10
					1	12
					1	14
					2	24
					3	6
2	64					
B-3 (module)	Module	adhesion of polarizer	culet, clean and polarizer	8	2	

3.1.3.2. 비전리방사선

사업장에서 사용되는 전자기장(electro magnetic field, EMF) 발생장치(생산 설비, 고용량 전기설비 등)는 대부분 극저주파자기장(1 ~ 300 Hz) 범위에 해당하는 60 Hz 대역의 장비인 것으로 파악되었다. 그리고 일부 가공라인에서는 CVD 및 dry Etch 공정에서 플라즈마 증폭을 위하여 RF(30 kHz ~ 300 MHz) generator를 사용하였다.

본 연구 범위에 해당하는 극저주파자기장 노출량을 파악하기 위하여 III-2와 같이 사업장별, 공정별로 개인노출량과 지역노출량을 측정하였다. 지역노출량 파악을 위해 측정한 장비(설비, 전기 설비 등)는 deposition, photo, coater, etch, strip, polyimide printer, rubbing, vacuum alignment system, one drop filling, implanter, culet/clean and polarizer, inspection, operating system test, roof rail, roof rail, panel board, operation room으로 16종이다.

표III-3. LCD 제조 공정의 극저주파자기장 발생 장비 기본 정보 (김준범 등, 2022)

사업장	사업장 라인	주공정	개인시료 측정 수	지역시료 측정 수		
				장비종류	측정 장비 수	측정지점 수
A	A-1(Fab)	TFT	6	5	11	85
		CF	4	5	7	60
		LC	2	4	5	61
	A-2(Fab)	TFT	6	5	13	157
		CF	6	2	6	84
		LC	7	4	6	105
A-3(module)	Module	8	1	4	142	
B	B-1(Fab)	TFT	6	4	10	76
		CF	3	3	3	45
		LC	10	4	8	125
	B-2(Fab)	TFT	5	4	14	152
		CF	2	1	4	60
		LC	6	2	3	62
	B-3(module)	Module	5	2	4	101
	ros room	ros room	4	1	1	1
합계			80	16	99	1,316

3.2. 연구 방법

3.2.1. 측정 방법

3.2.1.1. 전리방사선 측정 방법

전리방사선 노출수준을 파악하기 위하여 먼저 직독식 측정 장비인 Radiagem TM 2000(Canberra industries, Inc., U.S.A.) 서베이미터(survey meter)에 저에너지 범위의 X선 측정을 위한 SX-2R 프로브(NaI(Tl)섬광검출기)를 연결하여 전리방사선 발생위치를 특정하였다. 본 연구에 사용한 섬광검출기(신틸레이션 검출기(scintillation detector))는 일정 수준 이상의 방사선 수준에 노출 시 울리는 알람기능이 있어, 상대적으로 방사선 발생 수준이 높은 부분을 파악하는 보조장비로 사용하였다

실제 전리방사선 발생 수준 파악을 위한 주 측정기로는 ion chamber라고 불리는 전리함 검출기(저에너지 X선 검출용 프로브 부착)인 OD-01 Hx 서베이미터(Sensortechnik und Elektronik Pockau GmbH(STEP), Germany)를 사용하였다.

산업안전보건법 상 방사선의 정의 중 ‘엑스선발생장치는 5천 전자볼트(5 KeV) 이상의 에너지를 가진 전자선을 말한다’ 라고 되어 있다(고용노동부, 2022a). 본 연구에 사용된 신틸레이션 검출기의 SX-2R 프로브 에너지 측정 범위는 5 KeV ~ 200 KeV이고, 전리함 검출기 에너지 측정 범위는 6 KeV ~ 15 MeV로서 측정 장비는 산업안전보건법 상 엑스선발생장치의 방사선 측정범위를 충족하며 장비는 사전에 검교정을 받았다.

이온화 장치는 장비 내부에 설치된 상태로 장비 전체가 밀폐되어 있거나, 밀폐되지 않은 장비는 모두 스테인리스 스틸이나 무정전 PVC로 차폐되어 있었다. 따라서 이온화 장치로부터 발생하는 방사선 수준을 측정하기 위하여 이온화 장치가 설치된 장비의 밀폐된 표면 또는 차폐물에서 약 10 cm 거리에서 장비 또는 차폐물의 상단에서 하단까지 지그재그로 표면을 스캔하듯이 여러 부위를 측정 하여 최댓값을 분석에 활용하였다.

연구 중 방사선 측정 결과 타 장비에 비해 방사선 노출 수준이 높은(연간 방사선량 1 mSv 이상) 일부 장비(coater기 1대, rubbing기 1대)는 연구기간 중 방사선 발생 저감을 위한 작업환경 개선이 이루어져 동 장비에 대해서는 방사선 노출 수준을 재 측정 하였다.

재측정을 실시한 rubbing기의 경우 개선 전에는 rubbing 포를 교체하는 장비 끝단에 차폐물이 설치되지 않아 개방된 끝단에서 방사선을 측정하고, 개선 후에는 개선 전과 동일한 위치에서 측정되었으나 차폐물이 설치되어 장비가 완전히 차폐된 상태에서 측정하였다. 그 외 장비 가동조건 등은 개선 전후 동일하게 통제되었다.

본 연구에서는 방사선 발생위치를 특정하기 위한 방사선 지역노출특성과 더불어 근로자 개인 노출수준도 평가하였다. 개인 노출수준 평가는 별도의 측정을 하지 않고, 원자력안전법에 의거 방사선작업종사자 등에 대하여 개인선량계를 사용하여 사업장에서 방사선 누적노출량을 측정·관리하고 있어 사업장자료를 활용하여 근로자의 방사선 노출수준을 평가하였다. A사업장은 총 12명, B사업장은 343명의 근로자에 대한 방사선량을 관리하고 있는 것으로 조사되었다. 또한, 산업안전보건법에서는 방사선 노출근로자에 대해 특수건강진단을 실시하도록 하고 있어, 방사선 노출 근로자에 대한 특수건강진단 결과표를 확보하여 그 결과를 확인하였다(고용노동부, 2022b).

3.2.1.2. 비전리방사선 측정 방법

비전리방사선 역시 사업장별, 생산 라인별, 작업 공정별, 그리고 직무에 따른 극저주파자기장 노출 수준을 파악하기 위해 개인노출량과 지역노출량을 측정하였다.

먼저, 개인노출량은 작업시간 동안 연속 측정 및 데이터 저장이 가능한 Emdex lite(Enertech consultants Inc. Patterson, CA, USA)를 근로자 허리 부위에 부착하여 측정하였다. 연구에 사용된 측정 장비는 2가지로 standard field용 Emdex lite 5대와 high field용 5대를 사용하였다. Standard field 측정기의 측정 범위는 0.01 μT ~ 300 μT , 측정 주파수 범위는 40 ~ 800 Hz, 분해능(resolution)은 0.01 μT 였다. High field 측정기의 측정 범위는 0.5 μT ~ 7 mT, 측정 주파수 범위는 40 ~ 1,000 Hz, 분해능은 0.5 μT 이었고 sampling rate는 두 장비 모두 4 sec이었다.

개인노출량 측정 시 근로자 직무에 따른 차이를 분석하기 위해 근로자의 직무를 크게 엔지니어(테크니션)와 오퍼레이터 2개의 직무로 구분하였다. 사업장에 따라서 엔지니어 또는 테크니션으로 불리는 근로자들은 생산 설비 및 장비에 이상발생 시 조치하거나 고장발생 시 수리하는 업무를 수행하며, 오퍼레이터는 모니터를 통해 생산설비의 이상상태를 확인하거나, 운전조건을 조정·변경하고 제품 불량검사 등의 업무를 수행하였다. 엔지니어와 오퍼레이터 하부분류로 세부 직무들을 분류할 수 있지만 사업장별로 분류하는 기준이 다르고, 세부 직무의 경우 한명의 근로자가 여러 직무를 수행하는 경우가 많아 본 연구에서는 크게 두 가지 직무로만 분류하였다. 추가적으로 B사는 생산라인 밖의 별도의 공간인 ros(remote operation system) room에서 모니터를 통해 전산관리 및 생산 진도관리 등의 업무를 수행하는 근로자들이 있었다. 라인 밖의 공간에서 근무하는 이들 근로자의 극저주파자기장 노출량과 생산 라인 내에서 근무하는 근로자들의 노출량 비교를 위해 ros room 근로자의 작업위치 및 출입구 근처 위치에서 개인노출량 측정기를 사용하여 극저주파자기장 노출량을 측정하였다.

설비에서 발생하는 극저주파자기장 노출수준 파악을 위한 지역노출량은 측정 전 교정을 실시한 ELT-400(Narda safety test solution, Germany) 1대를 사용하여 측정

하였다. 3축 등방성 프로브(100 cm³)가 연결된 ELT-400 장비는 측정 주파수 범위가 1 Hz ~ 400 kHz로 본 연구의 측정대상 주파수 대역(60 Hz)을 포함하였으며, 측정범위는 최대 80 mT였다.

설비에서 발생하는 극저주파자기장 지역노출량은 설비 및 파워케이블, 모터, 모니터, 배전반 등 부속설비의 표면 또는 차폐물의 표면에서 3 cm 떨어진 거리에서 지그재그로 표면을 스캔하듯이 여러 부위를 측정하여 최댓값을 분석에 활용하였다. 3 cm 거리에서 측정 시 주변 보다 다소 높은 극저주파자기장 노출수준(약 5 μT)을 보인 설비는 추가적으로 10 cm 또는 30 cm 떨어진 거리에서 측정하여 거리에 따른 극저주파자기장 노출 수준의 감쇠 효과를 확인하고자 하였다.

3.2.2. 데이터 처리 및 평가 방법

3.2.2.1. 전리방사선 측정결과 데이터 처리 및 평가 방법

우리나라에서 사업장 근로자들에게 노출되는 유해물질 수준을 일정수준 이하로 관리하여 근로자들이 건강하고 안전하게 근무할 수 있도록 하는 주무부처는 고용노동부이다. 특히 고용노동부 고시로 ‘화학물질 및 물리적 인자의 노출기준’을 두어 사업장 유해물질을 노출기준 이하로 관리하도록 하고 있으나, 고용노동부 고시에 물리적 유해인자인 전리방사선 및 비전리방선에 대한 노출기준은 규정되어 있지 않다. 다만 고시에 노출기준이 규정되어 있지 않은 유해인자는 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서 매년 채택하는 노출기준(threshold limit values, TLVs)을 준용하도록 하고 있다(고용노동부, 2020).

전리방사선의 노출기준은 ACGIH에서 연간 50 mSv 이하, 5년간 100 mSv 이하로 규정하고 있는데 이는 원자력안전법의 기준과 동일하다. 국내 사업장들은 원자력안전법에 의거 방사선 피폭수준을 관리하고 있어 본 연구에서도 원자력안전법의 방사선방호 등에 관한 기준(방사선 종사자: 연간 50 mSv 이하, 5년간 100 mSv 이하; 수시출입자 및 운반종사자: 연간 6 mSv 이하; 그 외 종사자: 연간 1 mSv 이하)과 노출 수준을 비교하였다(원자력안전위원회, 2021).

전리방사선에 대한 근로자 개인노출량은 원자력안전법 제91조 제1항(방사선장해 방지조치), 시행령 제131조(측정), 제133조(피폭관리) 및 시행규칙 제 122조(피폭방사선량 평가 및 관리)에 의거 3개월 단위로 보관하고 있는 피폭선량 결과 1년치를 확보하여 연간 선량으로 환산하여 원자력안전법 기준과 비교하였다(원자력안전위원회, 2021).

이온화 장치 사용 장비로부터 발생된 방사선 지역발생수준(mSv/hr)을 원자력안전법 기준과 비교하기 위해 근로자의 일 방사선 노출 평균 시간을 추정하여 연간 방사선량으로 변환하였다.

LCD 제조 사업장 근로자들은 3교대 근무를 하였으며, 두 사업장 모두 일 평균 설비에 투입 되는 유리기판은 약 1,200장 ~ 1,800장으로, 근로자의 근무 시간 당 설비에 투입되는 유리기판은 약 400장 ~ 600장으로 파악되었다. LCD 제조 설비에 유리기판이 투입 되면 정전기 제거를 위해 이온화 장치가 평균 약 10초 정도 작동하여 일 평균 근로자 작업시간 동안 이온화 장치의 작동시간을 최대 약 100분(6,000초 = 600장 × 10초)으로 추정하였다. 그러나 공정은 대부분 자동화되어 있어 근로자들은 이온화 장치가 작동되는 동안 설비 옆에 상주하여 근무하지 않고, 설비 모니터 조작, 점검 등 작업이 있을 때만 설비 근처에서 작업을 하였다. 따라서 근로자들이 실제 이온화 장치가 작동되는 동안 설비 근처에서 방사선에 노출될 수 있는 실제 시간은 근로자 면담과 작업 특성분석 결과를 통해 5분에서 최대 10분으로 추정하였다.

3.2.2.2. 비전리방사선 측정결과 데이터 처리 및 평가 방법

비전리방사선 노출기준 역시 고용노동부 고시(화학물질 및 물리적 인자의 노출기준)에 규정되어 있지 않아 ACGIH 노출기준(TLVs)을 준용하여 측정결과와 비교하였다. ACGIH의 노출기준은 최댓값(Ceiling value)으로 주파수에 따라 다음 식에 의한 값을 초과하지 않도록 하고 있다(ACGIH, 2020). 즉 60 Hz 주파수에서의 극저주파자기장 노출기준은 1 mT이 된다.

$$B_{TLV} = \frac{60}{f}$$

여기서, f : 주파수(Hz)

B_{TLV} : 자속밀도(mT)

현재 우리나라 극저주파자기장 강도기준인 과학기술정보통신부의 ‘전자파인체보호기준’ 중 직업인 기준은 $416.6 \mu T(5/f, f=60 \text{ Hz})$ 로 설정되어 있으나 이는 ICNIRP에서 1998년 제시한 기준과 동일하다. 그러나 ICNIRP에서 2010년 직업인 극저주파자기장 노출기준을 $1,000 \mu T(1 \text{ mT})$ 로 명시 하였다.

따라서 과학기술정보통신부의 전자파인체보호기준이 ICNIRP 기준을 준용한 점과 ACGIH 노출기준을 고려하여, 본 연구에서는 LCD 제조 사업장 전자설비의 주파수 대역(60 Hz)에서의 극저주파자기장 최댓값 노출수준이 1 mT(10 G)를 초과 여부를 평가하였다.

Emdex lite를 사용하여 근로자 근무시간 동안 누적 측정된 개인노출량 측정 결과는 전용 프로그램을 사용하여 데이터를 다운받아 분석하였다. 본 연구에는 standard field용 장비 5대와 high field용 장비 5대를 사용하였는데 분해능이 각각 $0.01 \mu T$ 와 $0.5 \mu T$ 로 상이하였다. 즉 standard field용 장비로 측정한 데이터는 $0.01 \mu T$ 부터 데이터가 저장되나, high field용 장비로 측정한 데이터는 $0.5 \mu T$ 미만의 값이라도 $0.5 \mu T$ 로 저장이 되어, 측정 결과 값의 평균 계산 시 standard field용 측정기로 측정한 데이터의 평균이 high field용 측정기로 측정한 데이터의 평균 보다 과소평가

된다. 이러한 영향을 제거하기 위하여 개인 평균노출수준 분석 시에는 standard field용 측정기로 측정한 결과 0.5 μT 이하로 측정된 값을 0.5 μT 로 데이터 처리하여 분석하였다.

극저주파자기장 지역노출량 측정을 위해 사용한 ELT-400 장비는 직독식 장비로 측정데이터가 저장되지 않아, 측정값을 기록지에 수기로 작성 후 엑셀파일에 정리하여 분석하였다.

3.2.2.3. 통계분석 방법

본 연구의 통계 검정을 위해 PASW (v24.0, IBM) 프로그램을 사용하였다. 가설 검정을 위해 귀무가설은 ‘사업장, 사업장 라인, 생산 라인, 공정, 장비, 직무 등에 따라 방사선 노출수준에 차이가 없을 것이다’라고 설정하고 대립가설은 ‘사업장, 사업장 라인, 생산 라인, 공정, 장비, 직무 등에 따라 방사선 노출수준에 차이가 있을 것이다’라고 설정하였다. 통계 검정은 t검정, paired-t검정, 그리고 일원분산분석을 데이터의 특성에 따라 달리 적용하였고, 유의수준(p) 0.05를 적용하였다.

기초통계량으로 산술평균(arithmetic mean, AM), 표준편차(standard deviation, SD), 범위(range) 그리고 표준오차(standard error, SE)를 분석하였고, 데이터가 정규성을 만족하지 않아 기하평균(geometric mean, GM)과 기하표준편차(geometric standard deviation, GSD)도 분석하였다.

본 연구에서는 그래프에서 표준오차 값을 제시하였는데, 집단 내 표본수가 달라 두 집단 차이에 대한 신뢰구간이 상호 겹치는지 여부를 시각화하여 확인 할 수 있어 표준편차 대신에 표준오차를 그래프에 제시하였다.

IV. 연구 결과

4.1. 전리방사선 노출수준 평가 결과

4.1.1. 전리방사선 개인노출수준

원자력안전법에 의거 개인선량계를 착용한 근로자의 피폭선량을 3개월 주기로 판독한 결과를 사업장으로부터 확보하여 근로자 개인노출수준을 파악하였다. A사업장은 12명, B사업장은 343명의 근로자가 원자력안전법에 따라 방사선 피폭수준을 관리하고 있었으며, 방사선 피폭수준을 관리하고 있는 근로자들은 모두 엔지니어였다.

A사업장 및 B사업장 근로자 모두 분기별 방사선 노출수준은 0.01 mSv로 파악되었으며, 연간 노출수준으로 환산 시 개인별 노출농도는 근로자 모두 0.04 mSv로 연간 유효선량 한도 이내로 분석되었다.

또한, 산업안전보건법에 따라 방사선 노출근로자에 대해 실시하는 특수건강진단 결과 질병 유소전자나 직업성 요관찰자 없이 모든 근로자가 정상인 것으로 나타났다.

표 IV -1. 전리방사선 개인노출수준(김갑배, 2016)

사업장 라인	직무	공정(부서)	근로자수	분기별 평균 노출 수준(mSv)	검진결과
A-1	엔지니어	cell장비반	1	0.01	정상
		포토장비반	1	0.01	정상
A-2	엔지니어	C/F계획보전반	2	0.01	정상
		포토일상보전반	1	0.01	정상
		포토계획보전반	2	0.01	정상
		Cell장비반	1	0.01	정상
		검사장비반	1	0.01	정상
		특화장비반	2	0.01	정상
B-1	엔지니어	D/E장비반	1	0.01	정상
		포토	23	0.01	정상
		dry Etch	49	0.01	정상
		CF	8	0.01	정상
		PI	24	0.01	정상
B-2	엔지니어	RB	8	0.01	정상
		ODF	27	0.01	정상
		포토	25	0.01	정상
		CF	28	0.01	정상
B-3	엔지니어	PI(RB포함)	42	0.01	정상
		ODF	53	0.01	정상
B-3	엔지니어	모듈 CP	56	0.01	정상

4.1.2. 전리방사선 지역노출특성

4.1.2.1. 사업장별 지역노출특성

직독식 장비로 측정한 이온화 장치에서 발생하는 표면방사선량률(노출량)은 표 IV-2와 같이 0.20 ~ 50.00 $\mu\text{Sv/hr}$ 로 나타났다. A사 표면방사선량률은 0.40 ~ 50.00 $\mu\text{Sv/hr}$, B사 표면방사선량률은 0.20 ~ 5.00 $\mu\text{Sv/hr}$ 로 A사 표면방사선량률이 B사 표면방사선량률의 약 10배 높은 수준으로 파악되었다.

측정결과를 연간유효선량과 비교하기 위하여 표면방사선량률의 최댓값에 일 작업 시간 동안 전리방사선에 노출되는 시간을 고려하여 연간 방사선량을 구하였다.

그림 IV-1과 같이 A사의 평균 연간 방사선량은 통계적으로 B사보다 유의하게 큰 것으로 분석되었다($t(32.415) = 2.445, p = 0.020$). A사의 평균 연간 방사선량은 $0.197 \pm 0.416(\text{AM} \pm \text{SD}) \text{ mSv}$ ($\text{SE} = 0.072$)로 평가되었으나, B사의 평균 연간 방사선량은 $0.020 \pm 0.041 \text{ mSv}$ ($\text{SE} = 0.006$)로 A사의 평균 연간 방사선량은 B사의 약 10배 수준으로 파악되었다.

표 IV-2. 사업장별 전리방사선 지역노출특성

사업장	측정 장비수	노출량 ($\mu\text{Sv/hr}$)		연간 방사선량 (mSv/yr)							p값
		최저	최고	AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
A	33	0.40	50.00	0.197	0.416	0.072	0.064	3.980	0.011	2.167	
B	50	0.20	5.00	0.020	0.041	0.006	0.011	2.158	0.004	0.217	0.020*
합계	83	0.20	50.00	0.090	0.276	0.030	0.022	3.860	0.004	2.167	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

* $p < 0.05$

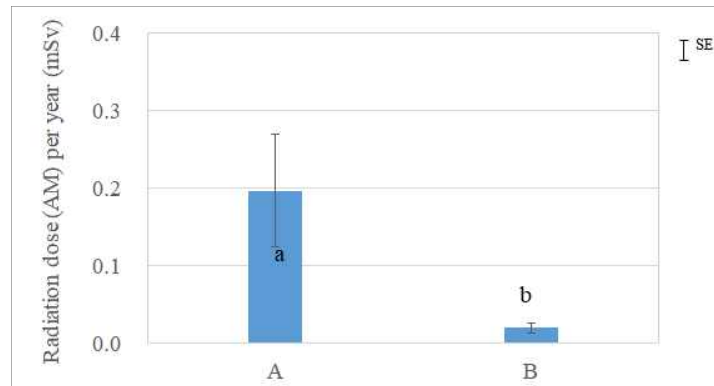


그림 IV-1. 사업장별 전리방사선 지역노출특성(김준범 등, 2021)

* 영문 소문자는 유의수준 0.05에서 통계적 차이를 나타냄

연구방법에 기술되었듯 A사는 정전기 제거를 위한 이온화 장치를 가공(Fab) 라인에만 사용하고 모듈(Module)라인에는 코로나 방전원리를 이용한 정전기제거 장치를 사용하여 가공라인만 방사선을 측정하고 모듈라인은 측정하지 않았다. 반면 B사는 가공라인과 모듈라인 모두에서 이온화 장치를 사용하여, 사업장간 비교를 위하여 모듈라인을 제외하고 A사와 B사 가공라인만 추가적으로 연간 방사선량 수준을 분석하였다.

표Ⅳ-3과 같이 모듈라인을 제외한 가공라인 간 비교에 있어서도 A사의 평균 연간 방사선량은 통계적으로 B사보다 유의하게 큰 것으로 분석되었다($t(32.304) = 2.495$, $p = 0.018$). A사의 평균 연간 방사선량은 0.197 ± 0.416 mSv (SE = 0.072), B사의 평균 연간 방사선량은 0.016 ± 0.032 mSv (SE = 0.005)로 평가 되었다. A사의 평균 연간 방사선량은 B사의 약 12배 수준으로 모듈라인에서 발생된 방사선량을 포함했을 때인 10배 보다 차이가 더 커졌다.

표Ⅳ-3. 사업장(가공라인)별 전리방사선 지역노출특성

사업장 (Fab)	측정 장비수	노출량 (μ Sv/hr)		연간 방사선량 (mSv/yr)							p값
		최저	최고	AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
A	33	0.40	50.00	0.197	0.416	0.072	0.064	3.980	0.011	2.167	
B	42	0.20	5.00	0.016	0.032	0.005	0.011	1.955	0.004	0.217	0.018*
합계	75	0.20	50.00	0.096	0.289	0.033	0.023	3.932	0.004	2.167	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

* $p < 0.05$

4.1.2.2. 사업장 라인별 지역노출특성

사업장 라인별 이온화 발생장치로부터 발생하는 전리방사선의 표면방사선량률은 표Ⅳ-4와 같이 A-1라인 $0.40 \sim 17.00 \mu$ Sv/hr, A-2라인 $0.50 \sim 50.00 \mu$ Sv/hr, B-1라인 $0.20 \sim 0.70 \mu$ Sv/hr, B-2라인 $0.20 \sim 5.00 \mu$ Sv/hr, B-3라인 $0.20 \sim 5.00 \mu$ Sv/hr로 A-2라인, A-1라인, B-1라인 순으로 높게 나타났으며, 가장 높은 표면방사선량률이 측정된 A-1라인의 표면방사선량률은 가장 낮은 B-2/B-3라인의 약 10배 수준으로 파악되었다.

표 IV-4. 사업장 라인별 전리방사선 지역노출특성

사업장 라인	측정 장비수	노출량 ($\mu\text{Sv/hr}$)		연간 방사선량 (mSv/yr)							범위 최저 최고	p값
		최저	최고	AM	SD	SE	GM	GSD				
A-1	19	0.40	17.00	0.074	0.093	0.021	0.048	2.356	0.017	0.368	0.001*	
A-2	14	0.50	50.00	0.364	0.601	0.161	0.094	6.315	0.011	2.167		
B-1	14	0.20	0.70	0.013	0.006	0.002	0.012	1.565	0.004	0.030		
B-2	28	0.20	5.00	0.018	0.040	0.007	0.010	2.142	0.004	0.217		
B-3	8	0.20	5.00	0.038	0.073	0.026	0.015	3.227	0.009	0.217		
합계	83	0.20	50.00	0.090	0.276	0.030	0.022	3.860	0.004	2.167		

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

* $p < 0.05$

A-2라인의 평균 연간 방사선량은 그림 IV-2에서 보는 것처럼 다른 라인에 비해 통계적으로 유의하게 큰 것으로 분석되었다($F(4, 78) = 5.152, p = 0.001$). 평균 연간 방사선량은 A-2 라인이 0.364 ± 0.601 mSv (SE = 0.161)로 가장 높았고, 그 다음으로 A-1 라인 0.074 ± 0.093 mSv (SE = 0.021), B-3 라인 0.038 ± 0.073 mSv (SE = 0.026), B-2 라인 0.018 ± 0.040 mSv (SE = 0.007), 그리고 B-1 라인 0.013 ± 0.006 mSv (SE = 0.002) 순으로 나타났다. 평균 연간 방사선량이 가장 높았던 A-2 라인은 가장 낮은 B-1 라인의 약 28배 수준으로 분석되었다.

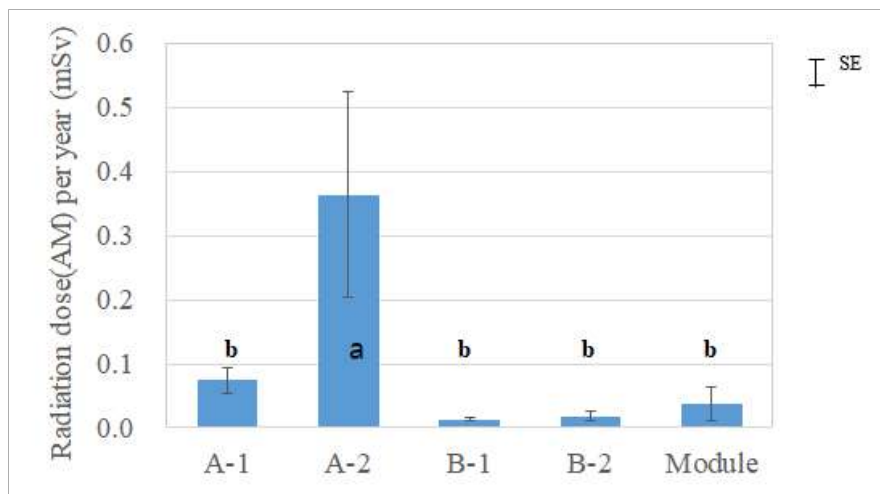


그림 IV-2. 사업장 라인별 전리방사선 지역노출특성(김준범 등, 2021)

* 영문 소문자는 유의수준 0.05에서 통계적 차이를 나타냄

4.1.2.3. 생산 라인별 지역노출특성

생산 라인별 이온화 발생장치로부터 발생하는 전리방사선의 표면방사선량률은 표 IV-5와 같다. 가공(fab) 라인은 0.20 ~ 50.00 $\mu\text{Sv/hr}$, 모듈(module) 라인은 0.20 ~ 5.00 $\mu\text{Sv/hr}$ 로 가공 라인의 표면방사선량률이 모듈라인 보다 약 10배 높은 수준인 것으로 파악되었다.

표 IV-5. 생산 라인별 전리방사선 지역노출특성

생산 라인	측정 장비수	노출량 ($\mu\text{Sv/hr}$)		연간 방사선량 (mSv/yr)							
		최저	최고	AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저	최고	p값
Fab	75	0.20	50.00	0.096	0.289	0.033	0.023	3.932	0.004	2.167	
Module	8	0.20	5.00	0.038	0.073	0.026	0.015	3.227	0.009	0.217	0.179
합계	83	0.20	50.00	0.090	0.276	0.030	0.022	3.860	0.004	2.167	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

가공 라인의 평균 연간 방사선량은 0.096 ± 0.289 mSv (SE = 0.033), 모듈 라인의 평균 연간 방사선량은 0.038 ± 0.073 mSv (SE = 0.026)로 가공 라인의 평균 연간 방사선량이 모듈 라인 보다 2.5배 높은 것으로 나타났으나, 그림 IV-3에서 보는 것처럼 통계적으로는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다($t(39.706) = 1.369$, $p = 0.179$).

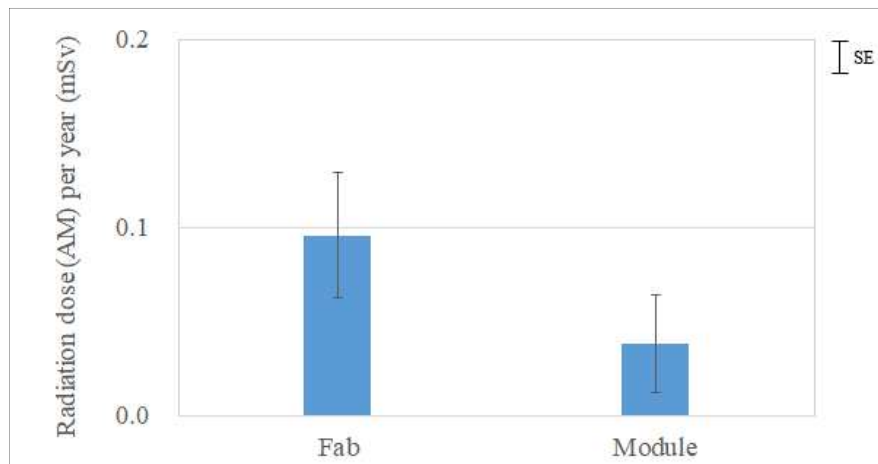


그림 IV-3. 생산 라인별 전리방사선 지역노출특성(김준범 등, 2021)

4.1.2.4. 공정별 지역노출특성

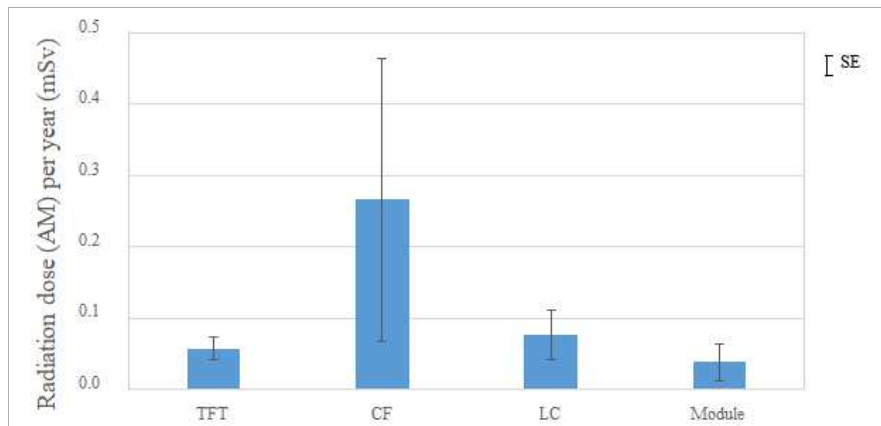
공정별로 이온화 발생장치로부터 발생하는 전리방사선의 표면방사선량률은 표Ⅳ-6과 같이 CF 라인 0.20 ~ 50.00 $\mu\text{Sv/hr}$, LC 라인 0.20 ~ 40.00 $\mu\text{Sv/hr}$, TFT 라인 0.20 ~ 17.00 $\mu\text{Sv/hr}$, Module 라인 0.20 ~ 5.00 $\mu\text{Sv/hr}$ 순으로 높게 나타났다.

표Ⅳ-6. 공정별 전리방사선 지역노출특성

공정	측정 장비수	노출량 ($\mu\text{Sv/hr}$)		연간 방사선량 (mSv/yr)							
		최저	최고	AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		p값
TFT	32	0.20	17.00	0.057	0.089	0.016	0.030	2.783	0.009	0.368	0.150
CF	11	0.20	50.00	0.266	0.659	0.199	0.027	6.607	0.009	2.167	
LC	32	0.20	40.00	0.076	0.198	0.035	0.017	4.271	0.004	1.040	
Module	8	0.20	5.00	0.038	0.073	0.026	0.015	3.227	0.009	0.217	
합계	83	0.20	50.00	0.090	0.276	0.030	0.022	3.860	0.004	2.167	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

일일 작업시간 동안 전리방사선에 노출되는 시간을 고려한 평균 연간 방사선량 역시 CF 라인 0.266 ± 0.659 mSv (SE = 0.199), LC 라인 0.076 ± 0.198 mSv (SE = 0.035), TFT 라인 0.057 ± 0.089 mSv (SE = 0.016), Module 라인 0.038 ± 0.073 mSv (SE = 0.026) 순으로 높게 나타났다. 가장 높은 연간 방사선량을 보인 CF 공정의 연간 방사선량은 가장 낮은 Module 공정의 약 7배 수준으로 분석되었으나, 그림Ⅳ-4에서 보는 것처럼 통계적으로는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다($F(3, 79) = 1.819, p = 0.150$).



그림Ⅳ-4. 공정별 전리방사선 지역노출특성(김준범 등, 2021)

4.1.2.5. 장비별 지역노출특성

이온화 장치를 사용하는 장비별로 발생하는 전리방사선의 표면방사선량률은 표 IV-7과 같이 Coater 0.20 ~ 50.00 $\mu\text{Sv/hr}$, Rubbing 0.30 ~ 40.00 $\mu\text{Sv/hr}$, Single rubbing aging 20.00 $\mu\text{Sv/hr}$, One drop filing 0.20 ~ 5.00 $\mu\text{Sv/hr}$, Cullet/clean polarizer 0.20 ~ 5.00 $\mu\text{Sv/hr}$, Developer 1.50 ~ 2.50 $\mu\text{Sv/hr}$, Stepper 0.20 ~ 1.94 $\mu\text{Sv/hr}$, Polyimide print 0.20 ~ 1.20 $\mu\text{Sv/hr}$, Ultra dry cleaning system 0.20 ~ 0.70 $\mu\text{Sv/hr}$, Align inspector 0.20 $\mu\text{Sv/hr}$ 순으로 나타났다.

표 IV-7. 장비별 전리방사선 지역노출특성

장비	측정 장비수	노출량 ($\mu\text{v/hr}$)		연간 방사선량 (mSv/yr)							p값
		최저	최고	AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
Coater	14	0.20	50.00	0.291	0.572	0.153	0.071	5.993	0.009	2.167	
Developer	4	1.50	2.50	0.045	0.010	0.005	0.044	1.256	0.033	0.054	
Stepper	23	0.20	1.94	0.019	0.013	0.003	0.016	1.719	0.009	0.052	
Rubbing	7	0.30	40.00	0.220	0.370	0.140	0.071	5.259	0.009	1.040	
Oner drop filing	16	0.20	5.00	0.025	0.052	0.013	0.013	2.330	0.009	0.217	0.077
Polyimide printer	7	0.20	1.20	0.007	0.008	0.003	0.006	1.974	0.004	0.026	
Ultra dry cleaning system	2	0.20	0.70	0.022	0.012	0.009	0.020	1.819	0.013	0.030	
Cullet/clean and polarizer	8	0.20	5.00	0.038	0.073	0.026	0.015	3.227	0.009	0.217	
Single rubbing aging	1	20.00	20.00	0.433	-	-	0.433	-	0.433	0.433	-
Align Inspector	1	0.20	0.20	0.009	-	-	0.009	-	0.009	0.009	-
합계	83	0.20	50.00	0.090	0.276	0.030	0.022	3.860	0.004	2.167	-

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

일일 작업시간 동안 전리방사선에 노출되는 시간을 고려한 평균 연간 방사선량은 single Rubbing Aging 0.433 mSv, coater 0.291 ± 0.572 mSv (SE = 0.153), rubbing 0.220 ± 0.370 mSv (SE = 0.140) 순으로 나타났다. 이들 3종의 장비는 0.100 mSv 이상의 평균 방사선량을 나타내어 다른 장비(0.007 ~ 0.045 mSv)보다 발생하는 방사선량이 현저히 큰 것으로 나타났다.

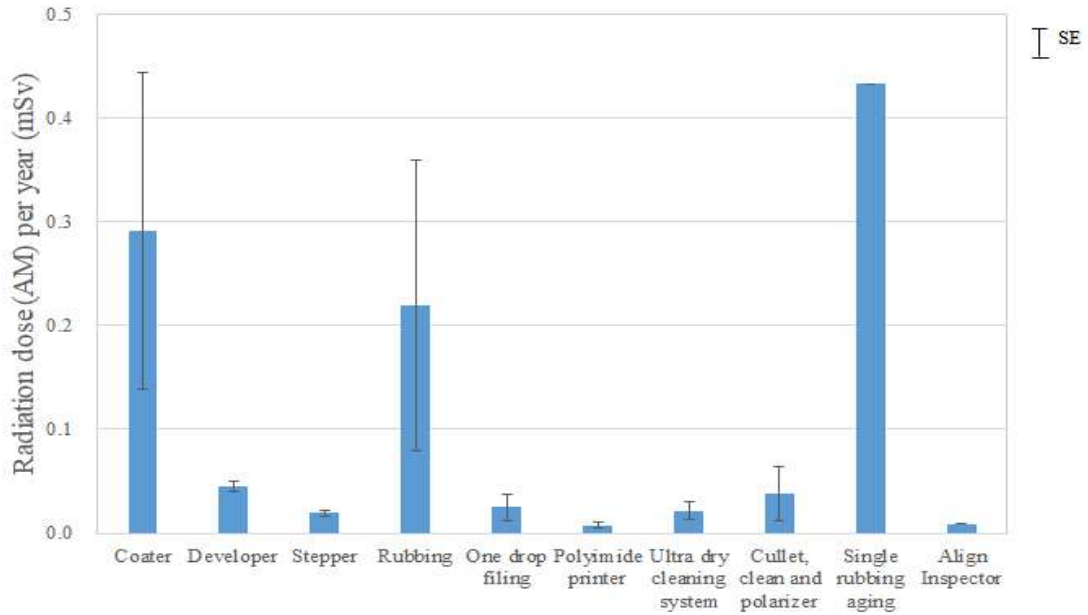


그림 IV-5. 장비별 전리방사선 지역노출특성(김준범 등, 2021)

특히, 가장 높은 방사선량을 보인 single rubbing aging는 가장 낮은 방사선량을 보인 PI printer의 약 62배 수준으로 파악되었으나, 그림 IV-5와 같이 평균 연간 방사선량이 큰 장비의 방사선량 변동(예: Coater기의 SE = 0.153)이 작았던 장비(예: PI printer의 SE = 0.003)보다 현저히 커 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 평가되었다($F(7, 73) = 1.926, p = 0.077$).

4.1.2.6. 개선 전후 지역노출특성 비교

연간 방사선량이 1 mSv 이상으로 평가되고, 표면 방사선량이 가장 높게 측정된 A사 coater($50.00 \mu\text{Sv/hr}$)와 rubbing($40.00 \mu\text{Sv/hr}$)기 2종의 장비에 대해서 연구 기간 중 사업장에서 방사선 발생량을 감소시키기 위한 개선대책을 실시하였다. 따라서 본 연구에서는 방사선 노출 저감 대책 시행 후 발생하는 방사선량을 재 측정하여 개선 전후 발생하는 방사선량을 비교하였다.

Rubbing기는 개선 전 긴 원통형의 러빙포 교체 작업 시 근로자의 작업을 용이하게 하기 위하여 장비 끝단을 차폐를 하지 않은 상태였으나, 최초 측정 후 무정전 PVC 재질로 개방된 장비 끝단을 밀폐하였다.

Coater기는 차폐물로 완전 밀폐가 되어 있었으나 최초 측정 시 신틸레이션 검출기를 사용하여 측정 할 때 주변 보다 방사선 발생 수준이 높아 알람이 울린 차폐물의 일부 부분과 틈에 대해 차폐물의 두께를 강화하고 차폐물 이음새 부분의 틈을 최소화하는 개선 대책을 시행하였다.

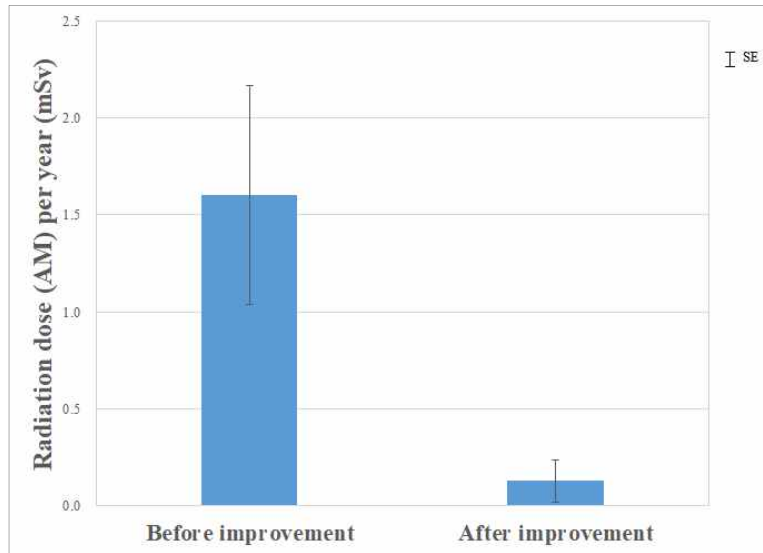


그림 IV-6. 전리방사선 감소대책 시행 전후 연간 방사선량 비교(김준범 등, 2021)

개선 전 장비로부터 노출 될 수 있는 평균 연간 방사선량은 그림 IV-6과 같이 1.604 ± 0.797 mSv (SE = 0.564)로 평가되었으나, 개선 후 연간 방사선량은 0.126 ± 0.153 mSv (SE = 0.109)로 현저히 감소하였다. 작업환경 개선을 통해 평균 연간 방사선량이 약 14.7배 수준으로 감소되었으나, 표본 크기가 작아 개선 전후의 방사선량 차이는 통계적으로 유의하지 않았다($t(1) = 2.199$, $p = 0.272$).

4.1.2.7. 이온화 장치 개수에 따른 지역노출특성

장비별 이온화 장치 사용 수량에 따른 방사선 발생수준을 파악하기 위하여 연간 방사선량이 아닌 표면방사선량률로 상관관계를 분석하였다.

표 IV-8과 같이 이온화 장치 사용이 적은 장비(1개 또는 2개)의 평균 표면방사선량률은 각각 1.830 ± 3.477 mSv/hr (SE = 1.048)와 3.213 ± 9.467 mSv/hr (SE = 1.700)이었고, 이온화 장치 사용 수량이 많은 장비(41개 또는 64개)의 평균 표면방사선량률은 각각 0.300 mSv/hr와 0.200 mSv/hr로 이온화 장치의 개수가 적은 경우 보다 낮은 수준인 것으로 파악되었다. 가장 높은 평균 표면방사선량율인 24.000 ± 22.627 mSv/hr (SE = 16.000)를 나타낸 장비에 사용된 이온화 장치의 수는 7개로 파악되었다.

표 IV-8. 이온화 장치 개수에 따른 표면방사선량률

이온화 장치 수량	측정 장비수	표면방사선량률 ($\mu\text{Sv/hr}$)					범위	
		AM	SD	SE	GM	GSD	최저	최고
1	11	1.830	3.477	1.048	0.694	3.693	0.20	12.00
2	31	3.213	9.467	1.700	0.520	4.705	0.20	50.00
3	7	4.206	5.824	2.201	2.244	3.239	0.40	17.00
4	8	0.780	0.569	0.201	0.621	2.087	0.20	1.94
5	6	1.800	2.588	1.056	0.772	4.231	0.20	6.90
6	5	0.260	0.134	0.060	0.240	1.506	0.20	0.50
7	2	24.000	22.627	16.000	17.889	3.121	8.00	40.00
8	1	2.000	-	-	2.000	-	2.00	2.00
9	1	0.200	-	-	0.200	-	0.20	0.20
10	3	6.967	11.290	6.518	1.409	10.816	0.20	20.00
12	1	0.900	-	-	0.900	-	0.90	0.90
14	1	0.300	-	-	0.300	-	0.30	0.30
24	2	0.300	-	-	0.300	-	0.30	0.30
33	1	0.700	-	-	0.700	-	0.70	0.70
41	1	0.300	-	-	0.300	-	0.30	0.30
64	2	0.200	-	-	0.200	-	0.20	0.20
합계	83	2.913	7.746	0.850	0.666	4.291	0.20	50.00

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

이온화 장치의 수와 표면방사선량률 간의 상관관계는 그림 IV-7과 같이 통계적으로 유의하지 않은 것으로 파악되었다($r = -0.067$, $p = 0.549$).

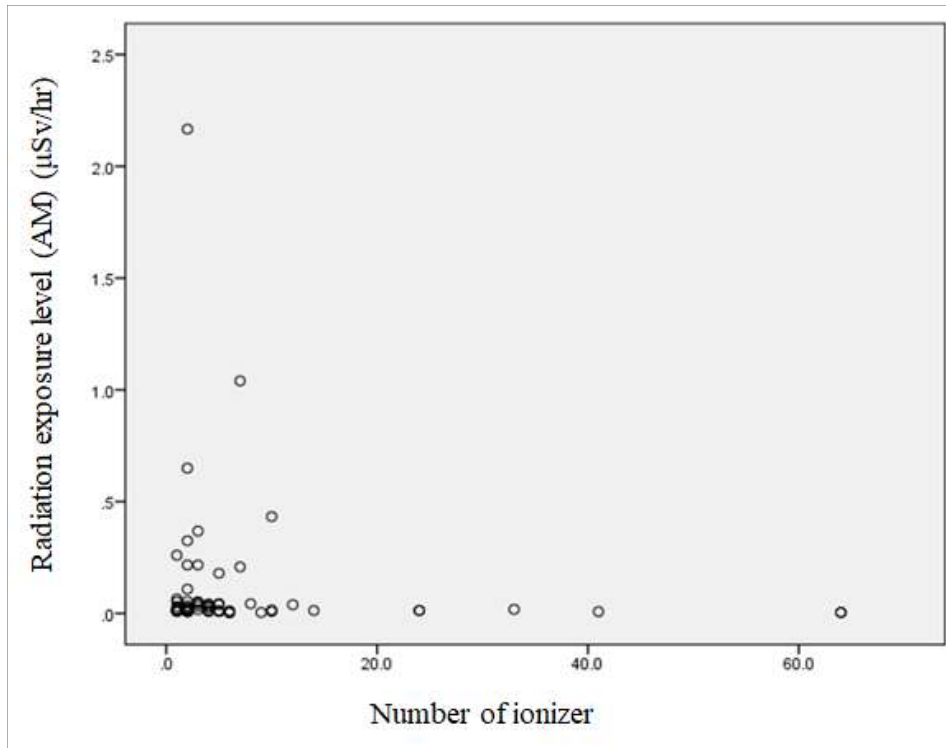


그림 IV-7. 이온화 장치 개수와 표면방사선량을 상관관계(김준범 등, 2021)

4.2. 비전리방사선(극저주파자기장) 노출수준 평가 결과

4.2.1. 극저주파자기장 개인 최대노출수준

극저주파자기장에 대한 ACGIH의 노출기준은 최댓값을 기준으로 설정되어 있어, 작업시간 동안 근로자 개인노출수준을 측정한 결과 값 중 최댓값을 기준으로 개인 노출수준을 분석하였다. Ros Room에서의 측정값은 근로자 개인에 대한 측정 결과가 아닌 ros room 중 근로자 작업위치에 측정장비를 설치하여 측정한 값으로, fab 라인에 들어가지 않고 작업하는 경우의 극저주파자기장 노출수준을 비교를 목적으로 측정한 값이어서 ros room에서 측정한 값은 공정 및 직무별 노출수준 비교 시에는 제외하고 분석 하였다.

4.2.1.1. 사업장별 개인노출수준

근로자에게 노출되는 극저주파자기장 평균 최대노출수준은 표Ⅳ-9에서 보듯 $6.311 \pm 6.746 \mu\text{T}$ (SE = 0.754)로 평가되었다. 사업장별로는 A사 근로자는 총 39명 측정했으며 극저주파자기장 평균 최대노출수준은 $6.664 \pm 6.895 \mu\text{T}$ (SE = 1.104) 였고, B사 근로자 41명의 극저주파자기장 평균 최대노출수준은 $5.975 \pm 6.669 \mu\text{T}$ (SE = 1.041)로 그림Ⅳ-8과 같이 A사 근로자와 B사 근로자에게 노출되는 극저주파 자기장 수준은 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다($t(78) = 0.455$, $p = 0.651$)

표Ⅳ-9. 사업장별 극저주파자기장 개인 최대노출수준

사업장	측정 근로자수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
A	39	6.664	6.895	1.104	4.274	2.618	0.68	29.5	
B	41	5.975	6.669	1.041	4.349	2.234	0.5	43.5	0.651
합계	80	6.311	6.746	0.754	4.312	2.409	0.5	43.5	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

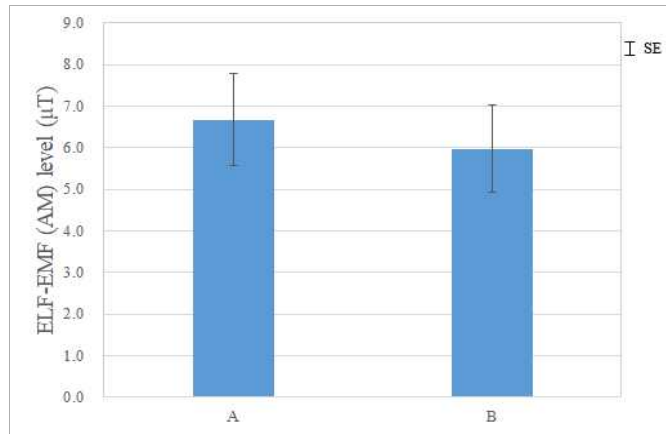


그림 IV-8. 사업장별 극저주파자기장 개인 최대노출수준

4.2.1.2. 사업장 라인별 개인노출수준

사업장 라인별 근로자에게 노출되는 극저주파자기장 평균 최대노출수준은 표 IV-10과 같이 A-2 라인이 $8.428 \pm 7.236 \mu\text{T}$ (SE = 1.660)로 가장 높았으며, B-1 라인 $6.583 \pm 8.439 \mu\text{T}$ (SE = 1.760), A-1 라인 $6.245 \pm 7.625 \mu\text{T}$ (SE = 2.201), B-2 라인 $5.621 \pm 3.307 \mu\text{T}$ (SE = 0.917), B-3 라인 $4.100 \pm 3.647 \mu\text{T}$ (SE = 1.631), A-3 라인 $3.105 \pm 2.979 \mu\text{T}$ (SE = 1.053) 순으로 나타났다. 그림 IV-9와 같이 극저주파자기장 노출 수준이 가장 높은 A-2 라인은 가장 낮은 A-3 라인의 약 2.7배 수준으로 나타났으나, 통계적으로는 유의한 차이가 없었다($F(5, 74) = 0.871, p = 0.505$).

표 IV-10. 사업장 라인별 극저주파자기장 개인 최대노출수준

사업장	측정 근로자수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
A-1	12	6.245	7.625	2.201	3.924	2.581	1.5	28.5	
A-2	19	8.428	7.236	1.660	5.943	2.468	1.04	29.5	
A-3	8	3.105	2.979	1.053	2.220	2.337	0.68	9.5	
B-1	23	6.583	8.439	1.760	4.369	2.553	0.5	43.5	0.505
B-2	13	5.621	3.307	0.917	4.846	1.754	2.5	12.5	
B-3	5	4.100	3.647	1.631	3.217	2.069	1.5	10.5	
합계	80	6.311	6.746	0.754	4.312	2.409	0.5	43.5	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

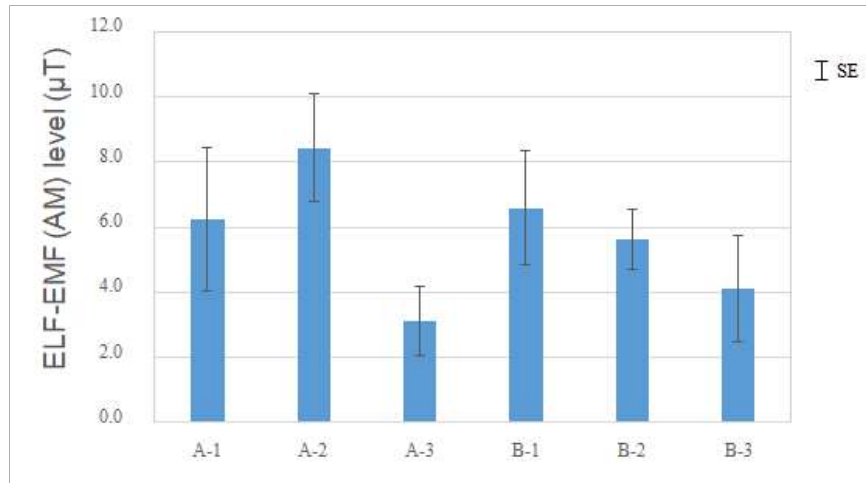


그림 IV-9. 사업장 라인별 극저주파자기장 개인 최대노출수준

4.2.1.3. 생산 라인별 개인노출수준

생산 라인별 극저주파자기장 개인 노출수준은 표 IV-11과 그림 IV-10과 같이 근소한 차이로 통계적 유의성이 없는 것으로 나타났다($F(2, 77) = 2.971, p = 0.057$). Fab 라인 근로자의 극저주파자기장 개인 최대노출수준이 $7.215 \pm 7.203 \mu T$ (SE = 0.907)로 가장 높았고, module 라인은 $3.488 \pm 3.141 \mu T$ (SE = 0.871)이었으며, fab 라인과 같은 건물의 라인 출입구 근처에 위치한 ROS Room에서의 극저주파자기장 노출수준은 $1.250 \pm 0.957 \mu T$ (SE = 0.479)로 가장 낮게 나타났다.

표 IV-11. 생산 라인별 극저주파자기장 개인 최대노출수준

생산 라인	측정 근로자수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
Fab	63	7.215	7.203	0.907	5.274	2.158	1.04	43.5	0.057
Module	13	3.488	3.141	0.871	2.560	2.214	0.68	10.5	
Ros room	4	1.250	0.957	0.479	0.984	2.246	0.5	2.5	
합계	80	6.311	6.746	0.754	4.312	2.409	0.5	43.5	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

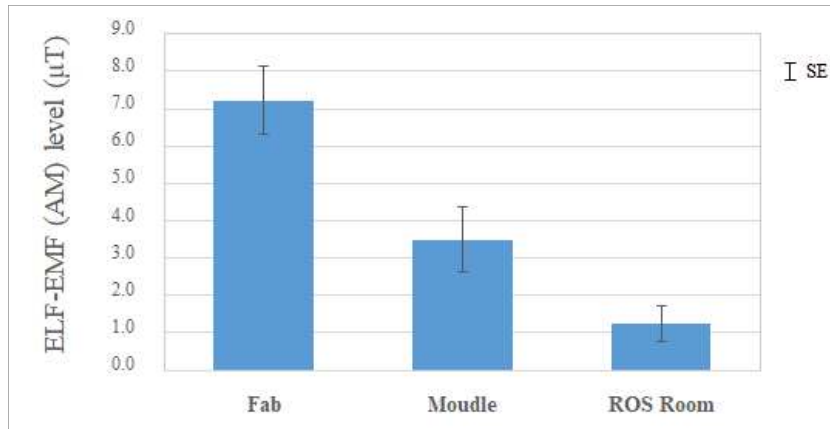


그림 IV-10. 생산 라인별 극저주파자기장 개인 최대노출수준

4.2.1.4. 공정별 개인노출수준

공정에 따른 극저주파자기장 개인 최대노출수준은 표 IV-12와 같이 TFT 라인 $8.334 \pm 8.809 \mu T$ (SE = 1.837), LC 라인 $7.148 \pm 6.769 \mu T$ (SE = 1.303), CF 라인 $5.375 \pm 4.517 \mu T$ (SE = 1.253), Module 라인 $3.488 \pm 3.141 \mu T$ (SE = 0.871) 순으로 나타났다. 극저주파자기장 노출수준이 가장 높은 TFT 라인은 가장 낮은 Module 라인의 약 배 2.4수준이었으나 그림 IV-11과 같이 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다($F(3, 72) = 1.638, p = 0.188$).

표 IV-12. 공정별 극저주파자기장 개인 최대노출수준

공정	측정 근로자수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
TFT	23	8.334	8.809	1.837	5.959	2.240	1.5	43.5	0.188
CF	13	5.375	4.517	1.253	3.995	2.236	1.04	16.5	
LC	27	7.148	6.769	1.303	5.434	2.041	1.5	29.5	
Module	13	3.488	3.141	0.871	2.560	2.214	0.68	10.5	
합계	76	6.577	6.816	0.782	4.661	2.261	0.68	43.5	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

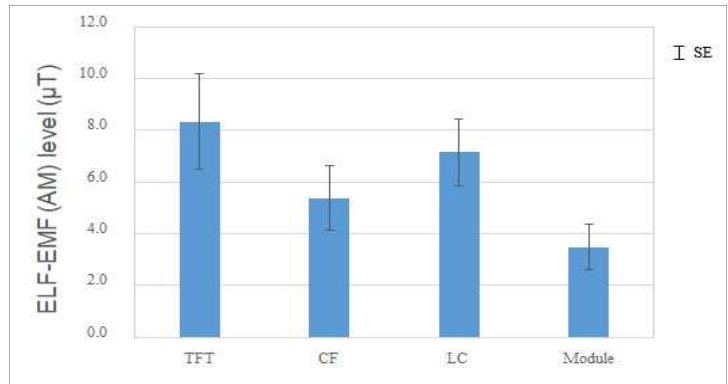


그림 IV-11. 공정별 극저주파자기장 개인 최대노출수준

4.2.1.5. 직무별 개인노출수준

직무에 따른 극저주파자기장 개인 최대노출수준은 그림 IV-12와 같이 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 파악되었다($t(74) = 2.150, p = 0.035$). 표 IV-13과 같이 엔지니어의 개인 최대노출수준은 $7.727 \pm 7.904 \mu T$ (SE = 1.107)로 오퍼레이터의 개인 최대노출수준인 $4.232 \pm 2.548 \mu T$ (SE = 0.510) 보다 높은 것으로 파악되었다.

표 IV-13. 직무별 극저주파자기장 개인 최대노출수준

직무	측정 근로자수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
Engineer	51	7.727	7.904	1.107	5.375	2.343	0.68	43.5	0.035*
Operator	25	4.232	2.548	0.510	3.485	1.938	1.04	10.5	
합계	76	6.577	6.816	0.782	4.661	2.261	0.68	43.5	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

* $p < 0.05$

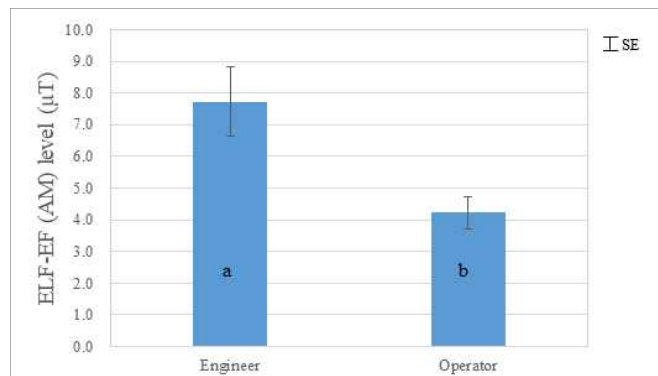


그림 IV-12. 직무별 극저주파자기장 개인 최대노출수준

* 영문 소문자는 유의수준 0.05에서 통계적 차이를 나타냄

개인노출량 측정을 위해 사용한 장비 프로그램을 통해 측정시간동안 근로자의 극저주파자기장 노출 패턴을 그림 IV-13과 같이 확인할 수 있었다. 그림 IV-13은 전체 측정 근로자 중 가장 높은 극저주파자기장에 노출되는 근로자의 작업시간 동안의 노출패턴으로, 작업시간 동안 지속적으로 일정 수준의 극저주파자기장에 노출되지 않고 간헐적으로 높은 수준 노출되는 것으로 파악되었으며, 이러한 패턴은 다른 근로자들에게도 유사하게 나타났다.

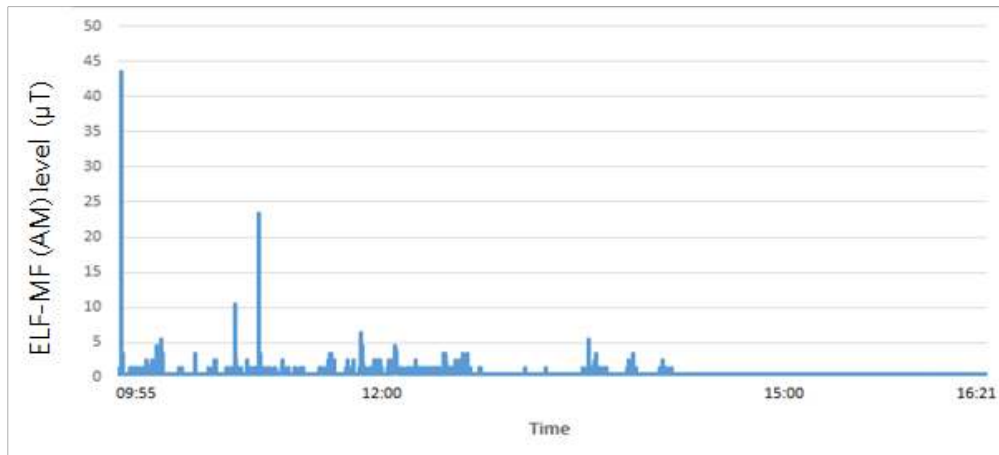


그림 IV-13. 작업시간 동안 근로자 극저주파자기장 노출 패턴(김준범 등, 2022)

4.2.2. 극저주파자기장 개인 평균노출수준

근로자들의 극저주파자기장 노출 패턴 확인 결과 작업시간 동안 일정 수준에 노출 되는 것이 아니라 작업에 따라 간헐적으로 높은 수준의 극저주파자기장에 노출 되고 있어, 측정시간 동안 근로자에게 노출되는 극저주파자기장 평균값을 기준으로 도 개인노출수준을 분석하였다.

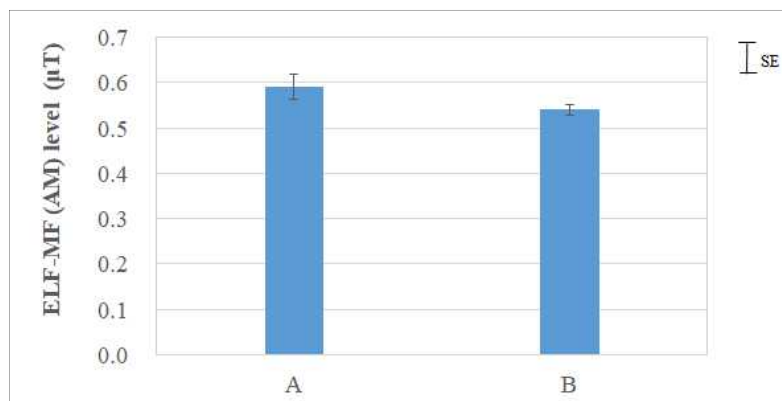
4.2.2.1. 사업장별 개인노출수준

근로자에게 노출되는 극저주파자기장 평균 노출수준은 $0.565 \pm 0.134 \mu\text{T}$ (SE = 0.015)였다. 표Ⅳ-14와 같이 사업장별로 A사 근로자는 $0.591 \pm 0.175 \mu\text{T}$ (SE = 0.028), B사 근로자는 $0.540 \pm 0.073 \mu\text{T}$ (SE = 0.011)의 극저주파자기장에 노출되는 것으로 분석되었다. 그림Ⅳ-14에서 보듯이 사업장 간 근로자에게 노출되는 극저주파자기장 수준은 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다($t(78) = 1.726$ $p = 0.088$).

표Ⅳ-14. 사업장별 극저주파자기장 개인 평균노출수준

사업장	측정 근로자수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
A	39	0.591	0.175	0.028	0.574	1.250	0.5	1.42	0.088
B	41	0.540	0.073	0.011	0.536	1.123	0.5	0.82	
합계	80	0.565	0.134	0.015	0.554	1.196	0.5	1.42	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차



그림Ⅳ-14. 사업장별 극저주파자기장 개인 평균노출수준

4.2.2.2. 사업장 라인별 개인노출수준

사업장 라인별 극저주파자기장 개인 평균 노출수준은 그림 IV-15와 같이 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다($F(5, 74) = 0.771, p = 0.573$). 사업장 라인별 근로자에게 노출되는 극저주파자기장 평균 노출수준은 표 IV-15와 같이 A-1 라인이 $0.608 \pm 0.268 \mu T$ (SE = 0.077)로 가장 높았으며, A-3 라인 $0.600 \pm 0.109 \mu T$ (SE = 0.038), A-2 라인 $0.577 \pm 0.124 \mu T$ (SE = 0.029), B-1 라인 $0.553 \pm 0.089 \mu T$ (SE = 0.019), B-2 라인 $0.530 \pm 0.046 \mu T$ (SE = 0.013), B-3 라인 $0.508 \pm 0.009 \mu T$ (SE = 0.004) 순으로 나타났다.

표 IV-15. 사업장 라인별 극저주파자기장 개인 평균노출수준

사업장	측정 근로자수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
A-1	12	0.608	0.268	0.077	0.575	1.365	0.5	1.42	0.573
A-2	19	0.577	0.124	0.029	0.567	1.201	0.5	0.97	
A-3	8	0.600	0.109	0.038	0.592	1.189	0.51	0.79	
B-1	23	0.553	0.089	0.019	0.547	1.150	0.5	0.82	
B-2	13	0.530	0.046	0.013	0.528	1.086	0.5	0.64	
B-3	5	0.508	0.009	0.004	0.508	1.018	0.5	0.52	
합계	80	0.565	0.134	0.015	0.554	1.196	0.5	1.42	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

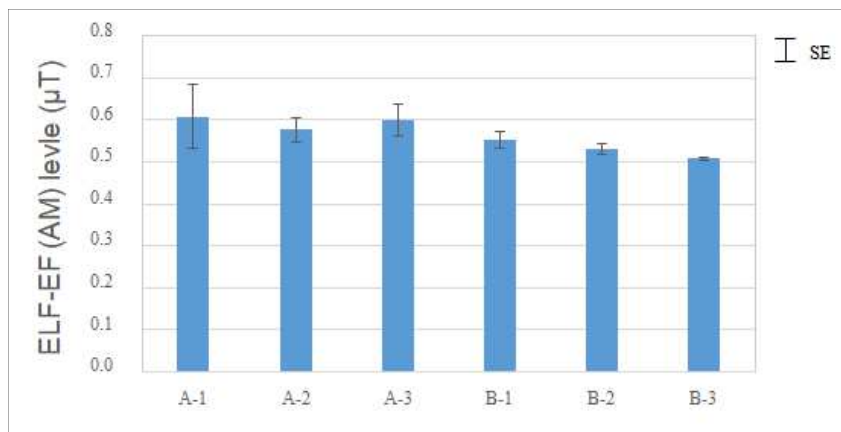


그림 IV-15. 사업장 라인별 극저주파자기장 개인 평균노출수준

4.2.2.3. 생산 라인별 개인노출수준

생산 라인별 극저주파자기장 개인 평균 노출수준은 통계적 유의성이 없는 것으로 나타났다($F(2, 77) = 0.485, p = 0.618$). 표 IV-16과 같이 fab 라인 근로자의 극저주파자기장 개인 최대노출수준이 $0.569 \pm 0.415 \mu T$ (SE = 0.018)로 가장 높았고, module 라인은 $0.565 \pm 0.095 \mu T$ (SE = 0.026), Ros Room에서의 극저주파자기장 평균 노출수준은 $0.501 \pm 0.001 \mu T$ (SE = 0.000)로 나타났다.

표 IV-16. 생산 라인별 극저주파자기장 개인 평균노출수준

생산 라인	측정 근로자수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
Fab	63	0.569	0.145	0.018	0.557	1.207	0.5	1.42	0.618
Module	13	0.565	0.095	0.026	0.558	1.166	0.5	0.79	
Ros room	4	0.501	0.001	0.000	0.501	1.002	0.5	0.5	
합계	80	0.565	0.134	0.015	0.554	1.196	0.5	1.42	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

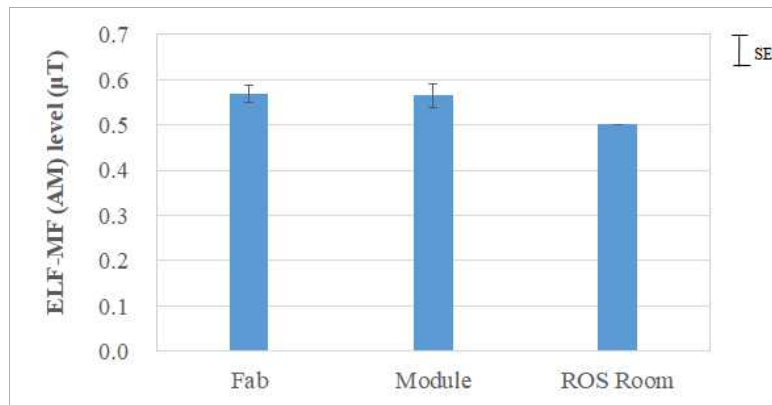


그림 IV-16. 생산 라인별 극저주파자기장 개인 평균노출수준

4.2.2.4. 공정별 개인노출수준

공정에 따른 극저주파자기장 개인 최대노출수준은 표 IV-17과 같이 TFT 라인 $0.597 \pm 0.197 \mu T$ (SE = 0.041), CF 라인 $0.582 \pm 0.142 \mu T$ (SE = 0.039), Module 라인 $0.565 \pm 0.095 \mu T$ (SE = 0.026), LC 라인 $0.539 \pm 0.077 \mu T$ (SE = 0.015) 순으로 나타났다. 그림 IV-17와 같이 공정 간 근로자 극저주파자기장 평균 노출수준은 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다($F(3, 72) = 0.788, p = 0.505$).

표 IV-17. 공정별 극저주파자기장 개인 평균노출수준

공정	측정 근로자수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
TFT	23	0.597	0.197	0.041	0.578	1.266	0.5	1.42	
CF	13	0.582	0.142	0.039	0.569	1.228	0.5	0.97	
LC	27	0.539	0.077	0.015	0.535	1.129	0.5	0.81	0.505
Module	13	0.565	0.095	0.026	0.558	1.166	0.5	0.79	
합계	76	0.568	0.137	0.016	0.557	1.199	0.5	1.42	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

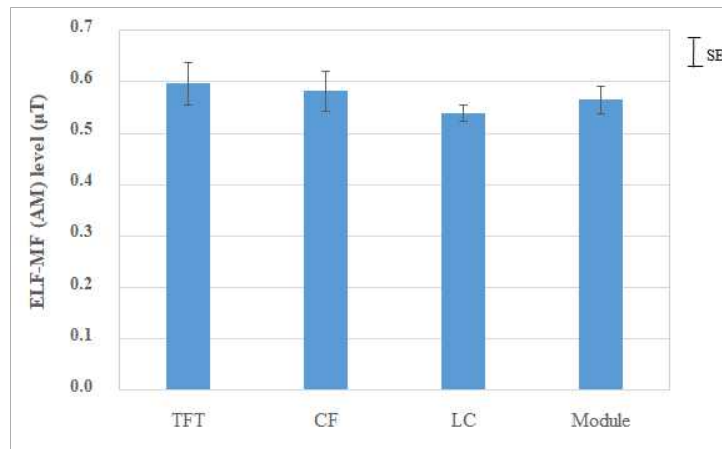


그림 IV-17. 공정별 극저주파자기장 개인 평균노출수준

4.2.2.5. 직무별 개인노출수준

근로자 직무에 따른 극저주파자기장 평균 노출수준은 표 IV-18과 같이 엔지니어의 개인 평균 노출수준은 $0.580 \pm 0.156 \mu\text{T}$ ($\text{SE} = 0.022$), 오퍼레이터의 개인 최대노출수준은 $0.545 \pm 0.083 \mu\text{T}$ ($\text{SE} = 0.017$)로 파악되었다. 엔지니어의 극저주파자기장 평균 노출수준이 오퍼레이터보다 높았지만 그림 IV-18과 같이 통계적으로는 유의한 차이가 없는 것으로 파악되었다($t(74) = 1.032$ $p = 0.306$)

표 IV-18. 직무별 극저주파자기장 개인 평균노출수준

직무	측정 근로자수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
Engineer	51	0.580	0.156	0.022	0.566	1.222	0.5	1.42	
Operator	25	0.545	0.083	0.017	0.540	1.143	0.5	0.79	0.306
합계	76	0.568	0.137	0.016	0.557	1.199	0.5	1.42	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

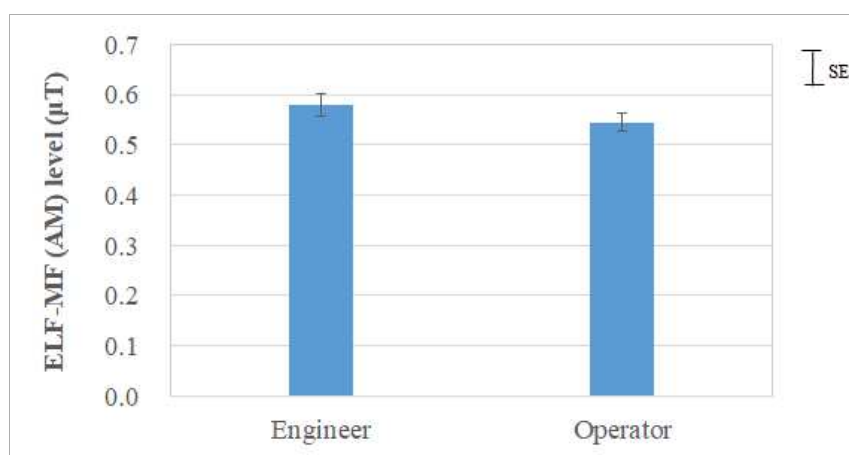


그림 IV-18. 직무별 극저주파자기장 개인 평균노출수준

4.2.3. 극저주파자기장 지역노출특성

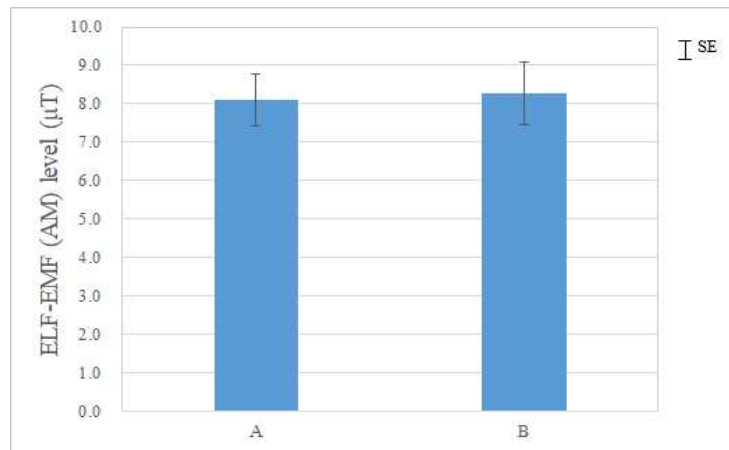
4.2.3.1. 사업장별 지역노출특성

사업장별 장비에서 발생하는 극저주파자기장 평균 최대노출량은 8.183 ± 18.411 μ T (SE = 0.517)로 측정되었다. 표Ⅳ-19와 같이 A사 극저주파자기장 평균 최대노출량은 8.101 ± 17.608 μ T (SE = 0.673), B사 평균 최대노출수준은 8.280 ± 19.328 μ T (SE = 0.801)였다. 그림Ⅳ-19와 같이 B사 장비에서 발생하는 극저주파자기장 노출량이 A사 보다 다소 높았지만 통계적으로는 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다($t(1,265) = -0.172, p = 0.864$)

표Ⅳ-19. 사업장별 극저주파자기장 지역노출특성

사업장	측정 지점수	극저주파자기장 노출수준 (μ T)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
A	685	8.101	17.608	0.673	2.480	4.447	0.07	198.70	0.864
B	582	8.280	19.328	0.801	2.685	4.592	0.06	287.20	
합계	1,267	8.183	18.411	0.517	2.572	4.513	0.06	287.20	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차



그림Ⅳ-19. 사업장별 극저주파자기장 지역노출특성

4.2.3.2. 사업장 라인별 지역노출특성

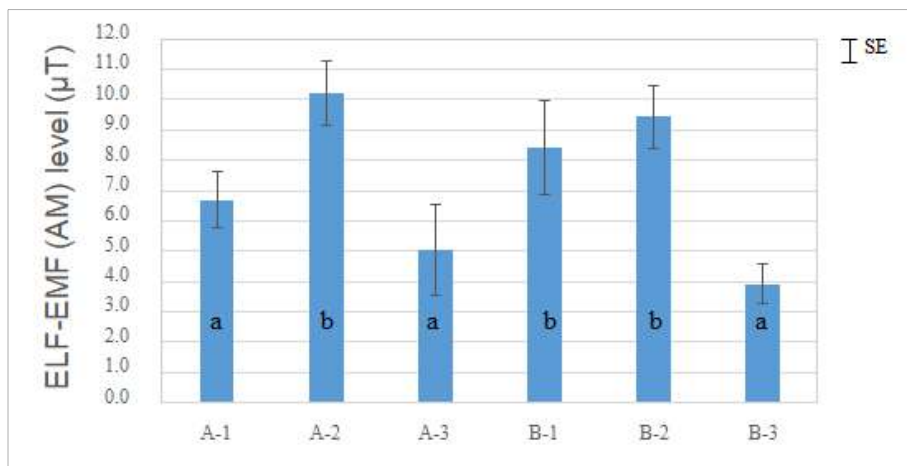
사업장 라인별 극저주파자기장 평균 최대노출량은 표Ⅳ-20과 같이 A-2 라인이 $10.197 \pm 19.523 \mu\text{T}$ (SE = 1.057)로 가장 높았다. 다음은 B-2 라인 $9.434 \pm 17.176 \mu\text{T}$ (SE = 1.051), B-1 라인 $8.436 \pm 23.889 \mu\text{T}$ (SE = 1.555), A-1 라인 $6.693 \pm 13.214 \mu\text{T}$ (SE = 0.925), A-3 라인 $5.050 \pm 17.758 \mu\text{T}$ (SE = 1.501), B-3 라인 $3.915 \pm 5.756 \mu\text{T}$ (SE = 0.648) 순으로 나타났다. 그림Ⅳ-20과 같이 극저주파자기장 노출 수준이 가장 높은 A-2 라인은 가장 낮은 B-3 라인의 약 2.6배 수준으로 나타났으며 통계적으로는 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($F(5, 1,261) = 3.022, p = 0.010$).

표Ⅳ-20. 사업장 라인별 극저주파자기장 지역노출특성

사업장	측정 지점수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
A-1	204	6.693	13.214	0.925	2.159	4.651	0.08	96.48	
A-2	341	10.197	19.523	1.057	2.980	4.825	0.07	124.80	
A-3	140	5.050	17.758	1.501	1.941	3.095	0.21	198.70	
B-1	236	8.436	23.889	1.555	2.801	4.188	0.06	287.20	0.010*
B-2	267	9.434	17.176	1.051	2.827	5.356	0.06	186.70	
B-3	79	3.915	5.756	0.648	1.987	3.285	0.19	42.07	
합계	1,267	8.183	18.411	0.517	2.572	4.513	0.06	287.20	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

* $p < 0.05$



그림Ⅳ-20. 사업장 라인별 극저주파자기장 지역노출특성

* 영문 소문자는 유의수준 0.05에서 통계적 차이를 나타냄

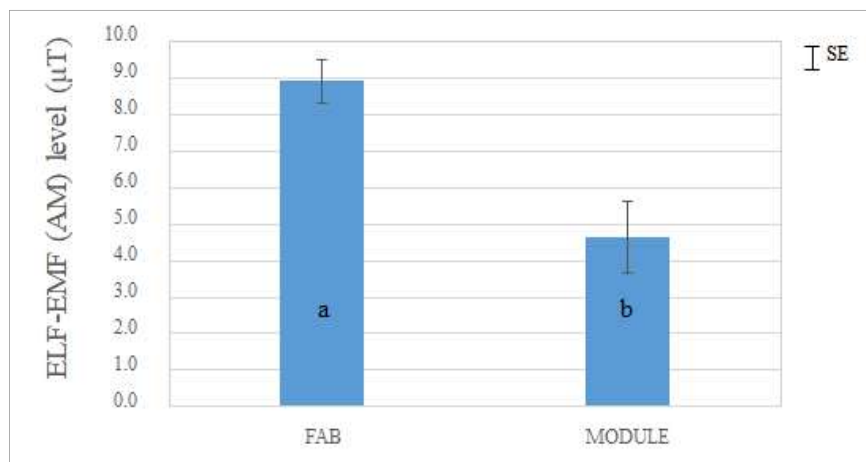
4.2.3.3. 생산 라인별 지역노출특성

생산 라인별 장비에서 발생하는 극저주파자기장 노출량은 표Ⅳ-21과 같이 fab 라인 8.924 ± 19.034 μT (SE = 0.588), Module 라인 4.641 ± 14.602 μT (SE = 0.987)로 나타났다. Fab 라인 장비에서 발생하는 극저주파자기장 노출량은 module 보다 1.9배 높았고, 그림Ⅳ-21과 같이 통계적으로도 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다($t(390.064) = 3.729$ $p < 0.001$).

표Ⅳ-21. 생산 라인별 극저주파자기장 지역노출특성

생산 라인	측정 지점수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
Fab	1048	8.924	19.034	0.588	2.723	4.787	0.06	287.20	
Module	219	4.641	14.602	0.987	1.957	3.155	0.19	198.70	<0.001*
합계	1,267	8.183	18.411	0.517	2.572	4.513	0.06	287.20	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차
* $p < 0.05$



그림Ⅳ-21. 생산 라인별 극저주파자기장 지역노출특성

* 영문 소문자는 유의수준 0.05에서 통계적 차이를 나타냄

4.2.3.4. 공정별 지역노출특성

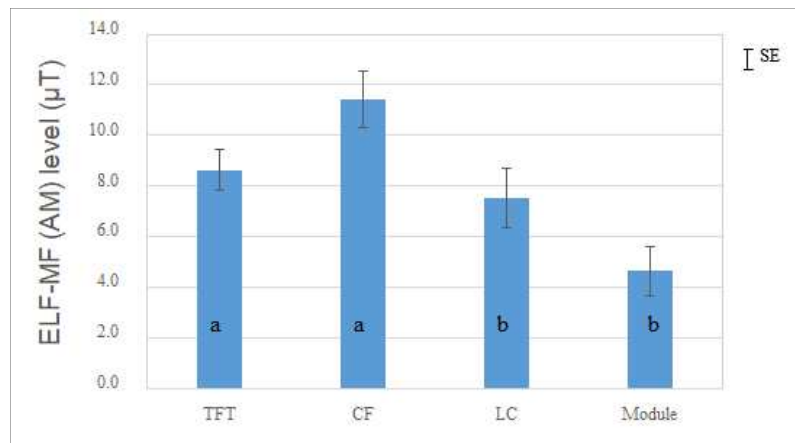
공정별 장비에서 발생하는 극저주파자기장 노출량은 표Ⅳ-22와 같이 CF 라인 11.414 ± 17.580 μT (SE = 1.125), TFT 라인 8.636 ± 17.593 μT (SE = 0.820), LC 라인 7.543 ± 21.594 μT (SE = 1.164), Module 라인 4.641 ± 14.601 μT (SE = 0.987) 순으로 나타났다.

표Ⅳ-22. 공정별 극저주파자기장 지역노출특성

공정	측정 지점수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저	최고	
TFT	460	8.636	17.593	0.820	2.559	5.000	0.08	186.70	
CF	244	11.414	17.580	1.125	4.083	4.684	0.06	120.90	
LC	344	7.543	21.594	1.164	2.221	4.356	0.06	287.20	0.001*
Module	219	4.641	14.601	0.987	1.957	3.155	0.19	198.70	
합계	1,267	8.183	18.411	0.517	2.572	4.513	0.06	287.20	

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차
* p < 0.05

공정별 극저주파자기장 노출량은 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다($F(3, 1,263) = 5.497, p = 0.001$). 그림 Ⅳ-22와 같이 TFT 라인과 CF 라인 장비에서 발생하는 극저주파자기장 노출량이 LC 라인과 module 라인에서 발생하는 극저주파자기장 노출량 보다 높은 것으로 파악되었다.



그림Ⅳ-22. 공정별 극저주파자기장 지역노출 특성(김준범 등, 2022)

* 영문 소문자는 유의수준 0.05에서 통계적 차이를 나타냄

4.2.3.5. 장비별 지역노출특성

장비별 지역노출량은 표Ⅳ-23과 같이 roof rail(천장 레일)이 123.265 ± 138.859 μT (SE = 69.430)으로 가장 높았고 다음은 panel board(배전반) 26.455 μT ± 23.666 μT (SE = 3.839), deposition 10.355 μT ± 19.782 μT (SE = 1.344) 순으로 측정되었다. 그 다음은 etch(식각), photo 등으로 모두 10 μT 미만의 극저주파자기장 노출량을 보였다.

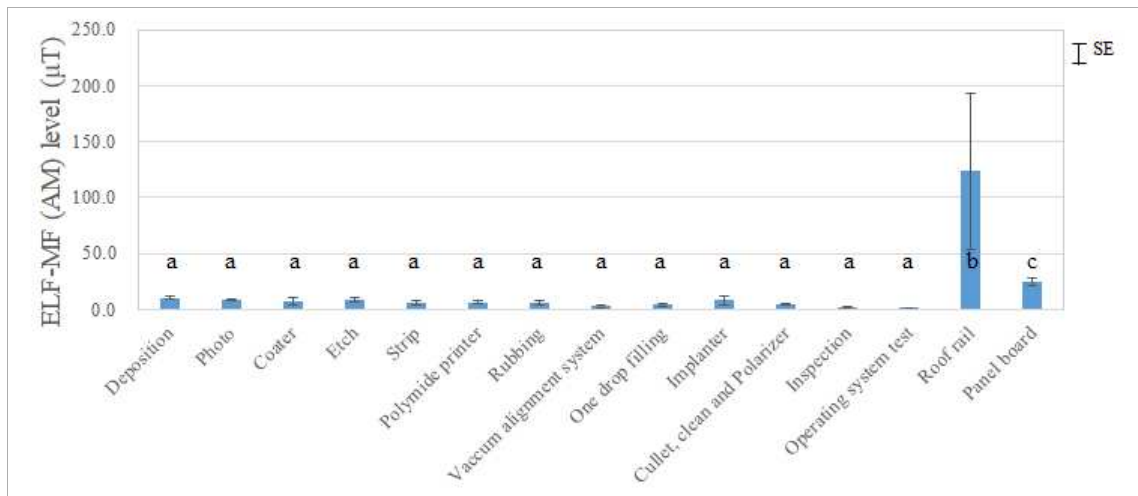
표Ⅳ-23. 장비별 극저주파자기장 지역노출특성(김준범 등, 2022)

장비	측정 지점수	극저주파자기장 노출수준 (μT)							p값
		AM	SD	SE	GM	GSD	범위 최저 최고		
Deposition	220	10.355	19.782	1.334	4.034	4.051	0.07	186.70	
Photo	309	8.451	13.471	0.766	2.629	5.183	0.06	87.89	
Coater	11	7.715	10.950	3.301	4.013	3.007	0.94	34.41	
Etch	106	8.628	21.156	2.055	1.894	5.328	0.08	124.80	
Strip	11	5.691	6.394	1.928	2.818	3.771	0.42	17.30	
Polyimide printer	138	6.792	11.993	1.021	2.647	3.910	0.11	91.49	
Rubbing	105	5.420	11.907	1.162	1.854	4.262	0.06	96.48	
Vacuum alignment system	19	2.622	5.032	1.154	1.219	3.237	0.10	22.77	<0.001*
One drop filling	57	3.966	6.634	0.879	1.511	3.860	0.14	30.23	
Implanter	18	7.857	14.953	3.524	2.627	4.769	0.20	63.30	
Cullet, clean and polarizer	215	4.500	14.669	1.000	1.919	3.074	0.19	198.70	
Inspection	12	2.121	2.491	0.719	1.336	2.599	0.37	8.95	
Operating system test	3	0.587	0.242	0.140	0.546	1.636	0.31	0.76	
Roof rail	4	123.265	138.859	69.430	41.466	7.644	4.76	287.20	
Panel board	38	26.455	23.666	3.839	13.177	4.774	0.19	72.72	
Operation room	1	0.240	-	-	0.240	-	0.24	0.24	-
합계	1,267	8.180	18.410	0.517	2.572	4.513	0.06	287.20	-

※ AM : 산술평균, SD : 표준편차, SE : 표준오차, GM : 기하평균, GSD : 기하표준편차

* p < 0.05

생산 장비가 없는 operation room에서 측정한 1건을 제외한 장비별 지역노출량은 그림Ⅳ-23과 같이 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($F(15, 1,251)=17.118, p < 0.001$). Operation room은 생산라인 내 장비 없이 컴퓨터와 모니터만 설치된 공간으로 평소에는 근로자들이 모니터를 통해 현장상황을 모니터링 하면서 작업이 필요할 때 현장으로 가기 위한 일종의 대기 공간으로, 비록 장비는 없지만 생산라인 내 위치하고 있어 장비에서 발생하는 극저주파자기장 노출수준과의 비교를 위해 Operation room에서도 측정을 하였다. 장비별 지역노출량은 roof rail(천장 레일)이 가장 높은 그룹(b)으로 그 다음 중간 그룹(c)은 panel board(배전반)으로 분석되었다. 마지막으로 나머지 장비(예: deposition, etch, photo 등)들은 통계적으로 가장 낮은 지역노출량(범위: 0.59 ~10.36 μT) 그룹(c)으로 구분되었다.



그림Ⅳ-23. 장비별 극저주파자기장 노출량(김준범 등, 2022)

* 영문 소문자는 유의수준 0.05에서 통계적 차이를 나타냄

4.2.3.6. 거리에 따른 지역노출량 변화

장비로부터 발생되는 극저주파자기장 발생량은 기본적으로 장비 또는 차폐물 표면에서 약 3 cm 떨어진 거리에서 측정하였다. 직독식 장비로 측정 시 주변 장비의 극저주파자기장 노출량 보다 다소 높은 노출량(약 5 μT)을 보이는 38개의 장비에 대해서는 30 cm 떨어진 거리에서의 극저주파자기장 노출량을 추가 측정하였다. 이때 30 cm 거리에서 측정된 노출량이 3 cm 거리에서의 노출량의 약 90 % 수준으로 감소한 장비에 대해서는 10 cm 거리에서도 극저주파자기장 노출량을 추가로 측정하였다.

그림Ⅳ-24에서 보는 것과 같이 극저주파자기장 지역노출량은 거리에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 3 cm 거리에서 측정 후 30 cm에서 추가 측정된 38개 장비의 지역노출량은 그림Ⅳ-24.a과 같이 3 cm 거리일 때 $39.059 \mu\text{T} \pm 59.345 \mu\text{T}$

(SE = 9.627)였던 값이 30 cm 거리에서 $3.070 \mu\text{T} \pm 3.643 \mu\text{T}$ (SE = 0.591)으로 3 cm 거리의 극저주파자기장 지역노출량의 약 7.9 % 수준으로 현저히 감소하였다 ($t(37) = 31.464, p < 0.001$).

또한, 각각 3 cm, 10 cm, 그리고 30 cm 거리에서 측정된 5개 장비의 지역노출량은 그림 IV-24.b와 같이 3 cm 거리에서 $53.274 \mu\text{T} \pm 28.426 \mu\text{T}$ (SE = 63.563), 10 cm 거리에서 $4.916 \mu\text{T} \pm 2.788 \mu\text{T}$ (SE = 6.235), 30 cm 거리에서 $1.346 \mu\text{T} \pm 0.541 \mu\text{T}$ (SE = 1.211)로 나타났다. 10 cm에서의 지역노출량은 3 cm에서의 평균 지역노출량의 9.4 % 수준으로 30 cm에서의 지역노출량 역시 3 cm에서의 평균 지역노출량의 2.8 % 수준으로 감소하였고, 거리가 멀어짐에 따라 통계적으로도 각각 유의한 차이가 있는 것으로 분석 되었다(3 cm와 10 cm비교; $t(4) = 8.832, p = 0.001$, 3 cm와 30 cm비교 ; $t(4) = 46.745, p < 0.001$). 반면 측정거리가 10 cm에서 30 cm로 증가 시 평균 지역노출량은 27.4 % 감소하였으나 통계적으로는 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다($t(4) = 1.575, p = 0.190$).

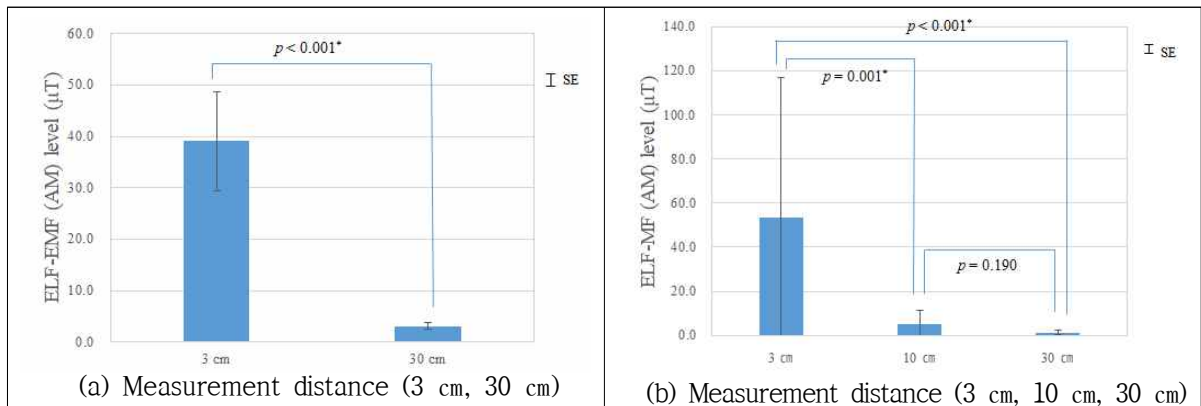


그림 IV-24. 측정 거리에 따른 극저주파자기장 노출량(김준범 등, 2022)

V. 고찰

5.1. 전리방사선 노출특성에 대한 고찰

본 연구에서는 국내 LCD 제조사업 2곳에서 발생하는 전리방사선과 비전리방사선(극저주파자기장) 노출특성을 파악하였다.

먼저 LCD 사업장 이온화 장치로부터 발생하는 표면방사선량률은 0.20 ~ 50.00 μ Sv/hr로 측정되었다. 이를 원자력안전법에 따른 연간유효선량 기준과 비교하기 위해 근로자들의 일일 전리방사선 평균 노출시간을 고려하여 계산한 연간 방사선량은 0.004 ~ 2.167 mSv로 평가되었다. 이는 원자력안전법에서 정한 방사선 작업종사자의 유효선량 한도인 연간 50 mSv 이하, 5년간 100 mSv 이하(연평균 20 mSv)와 수시출입자 및 운반종사자의 유효선량 한도인 연간 6 mSv를 초과하지 않으나, 그 외의 사람(일반인)에 대한 연간 유효선량 한도인 1 mSv 이하 기준을 충족하지 못하는 경우는 일부(2건) 있는 것으로 해석된다(원자력안전위원회, 2021).

그러나 연간 방사선량 계산을 위한 근로자들의 방사선 노출시간에 대해서는 사업장에서도 정확한 데이터를 보유하고 있지 않아, 방사선을 발생시키는 이온화 장치가동 시간과 근로자들이 방사선 발생 장비 인근에서 작업하는 시간 등을 근로자 인터뷰 등을 통해 추정하여 계산하였다. 또한 표면방사선량률 측정 시 신틸레이션 검출기로 방사선 발생량이 높은 지점을 파악한 후 발생량이 높은 지점에서 전리함 검출기로 장비의 표면에서 약 10 cm 떨어진 곳에서 방사선 지역발생수준을 측정 후 최대 노출 값을 기준으로 연간 방사선량을 계산하였다. 그리고 실제 정전기 제거를 위한 이온화 장치가 부착된 장비 부속품은 유리기판 상단에 설치되어 유리기판의 앞뒤 또는 좌우로 이동하면서 작동하기 때문에 근로자들이 방사선에 노출되는 시점은 이온화 장치가 근로자에게 멀어지는 지점일 수도 있으나 본 연구에서는 측정 결과 중 최댓값을 기준으로 평가하여, 이는 이온화 장치가 근로자에게서 가장 가까운 지점을 기준으로 연간 방사선 방사선량을 평가하였음 의미한다.

방사선 피폭을 줄이기 위한 3대 방어원칙은 거리, 시간, 차폐로 알려져 있으며, 가능한 한 발생원으로부터 먼 거리를 유지하고, 피폭 시간을 최소화하고, 발생원과 작업자 사이에는 차폐물을 설치하여야 한다.

즉, 방사선은 발생원에서 거리의 제곱에 반비례하여 감소하는 역자승법칙에 따르면 방사선 발생원으로부터 작업자들의 작업 장소 위치(거리)가 중요하다. 또한 발생원 인근에서의 작업 빈도, 그리고 방사선 노출 시간에 따라 본 연구에서 평가한 연간 방사선량은 달라질 수 있으나 본 연구에서 측정한 값으로 평가한 연간 방사선량은 근로자에게 최대 노출될 수 있는 지점을 기준으로 연간 노출시간을 고려한 평가 결과이다. 그러므로 본 연구에서 측정된 노출수준을 기준으로 계산한 연간 방사선량을 근로자들이 노출될 수 있는 최대 기준을 가정한 참고자료로는 활용될 수 있으나, 원자력안전법의 선량한도 기준과 비교를 위한 개인노출수준으로 해석하는 것은 주의가 필요하다. 실제 원자력안전법에 의해 방사선작업종사자를 대상으로 3개월 동안 방사선 개인노출수준을 측정하여 사업장에서 보관하고 있는 피폭자료 확

인 결과 분기별 근로자 피폭 평균 유효선량은 0.1 mSv로 본 연구의 연간 방사선량과는 차이가 있었다.

이온화 장치가 설치된 장비로부터 발생하는 방사선을 측정된 총 83개의 장비 중에서 연간 방사선량이 1 mSv 이상인 장비는 rubbing기와 coater기 총 2개로 LC공정 rubbing기의 연간 방사선량은 1.040 mSv, CF photo 공정 coater기의 연간 방사선량은 2.167 mSv로 평가되었다.

그러나 동일한 장비라도 사업장 라인 간 연간 방사선량에는 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 예를 들면, B-2라인 LC공정 rubbing기의 연간 방사선량은 0.009 mSv였으나, A-2라인의 rubbing기의 연간 방사선량은 1.040 mSv로 나타났다. coater기의 경우에도 B-2라인 TFT공정 coater기의 연간 방사선량은 0.009 mSv였으나, A-2라인의 coater기의 연간 방사선량은 2.167 mSv으로 나타나 장비의 작동 환경 또는 근로자 작업환경에 따라 방사선량에 차이가 큰 것으로 판단되었다.

특히, rubbing기의 경우 대부분 스테인리스 스틸이나 무정전 PVC 재질로 차폐되어 있으나, 2인 1조로 수행하는 러빙포 교체 작업의 편의를 위해 일부 rubbing기의 경우 러빙포를 교체하기 위한 장비 끝단이 완벽하게 차폐되지 않고 개방된 경우가 있었다. 즉 완전히 차폐되어 개방된 부분이 없는 rubbing기에서 정상작업 수행 시에는 방사선 발생 수준이 낮으나, 장비 끝단이 개방된 경우에는 방사선 노출 수준이 높을 수 있다.

이렇듯 연간 방사선량이 높았던 rubbing기와 coater기에 대해 차폐 또는 밀폐 등의 감소대책을 시행하면 방사선량 노출 수준을 감소시킬 수 있는 것으로 파악되었다. 본 연구 수행 중 개방되었던 rubbing기의 끝단을 개폐가 가능한 무정전 PVC로 차폐한 후 rubbing기에서 발생하는 방사선량을 평가한 결과, 기존 1.040 mSv이었던 연간 방사선량이 차폐 후에는 0.234 mSv으로 현저히 감소됨을 확인할 수 있었다. 또한, coater기에 대해서는 차폐물의 두께를 보강하고 이음새에서 누출이 없도록 밀폐하여 개선 전 2.167 mSv이었던 연간 방사선량이 개선 후 0.017 mSv로 현저히 감소한 것으로 확인 할 수 있었다.

제조사에서는 그림 V-1과 같이 차폐물의 재질과 두께에 따른 차폐효율 데이터를 제공하고 있으므로, 사업장 방사선 관리를 위해서는 제조사 제공 데이터를 참고하여 노출기준 이하로 방사선량을 관리할 수 있도록 적절한 재질과 두께의 차폐물을 선정하여 시공하는 것 또한 사업장 방사선 관리를 위하여 중요하다.

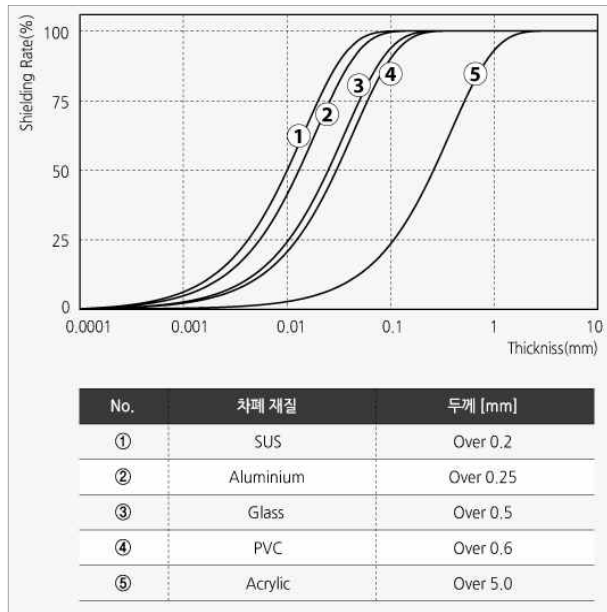


그림 V-1. 차폐 재질 및 두께에 따른 차폐 효율(이온화 장치 제조사 제공)

그리고 장비로부터 발생하는 연간 방사선량이 1 mSv 이상인 장비는 모두 B사의 장비인 점과, 연구 결과에서 보듯이 사업장별, 사업장 라인별 방사선 지역노출수준은 통계적으로 유의한 차이가 있었으나 생산 라인별, 공정별, 장비별 지역노출수준은 통계적으로 유의한 차이가 없었던 점을 고려하면, 방사선 노출 수준에 대한 통계적 차이점은 A사와 B사의 방사선 노출 관리적 측면에서의 차이인 것으로 판단된다.

이러한 연구 결과는 LCD 공정 장비로부터 발생하는 방사선 노출량을 통제하기 위해 작업자에게 노출되는 방사선 수준을 감소시키기 위한 차폐물을 설치하고 차폐물 설치 시 이음새 틈을 최소화 하고, 제조사에서 제공하는 차폐물 재질 및 두께에 따른 방사선 방호 효율 성적서를 참고하여 방사선을 충분히 방호할 수 있는 차폐물 재질과 두께를 선정하여 적용하는 것이 필요함을 시사하고 있다.

본 연구에서는 이온화 장치 개수에 따른 전리방사선 노출량에 대한 상관관계를 분석하였다. 기존 연구에서는 발생원에서부터 30 cm 거리에서 모노형(1개) X선 발생장치에서 1.64 mSv/hr, 멀티형(7개) X선 발생장치에서 3.51 ~ 4.04 mSv/hr의 방사선이 발생한다고 보고하여(이수환 & 이동훈, 2018), 선원(이온화 장치)의 개수에 따라 방사선량에 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 이온화 장치의 개수와 방사선량 간에 통계적으로 유의한 상관관계가 없는 것으로 나타났다.

선행연구의 경우 통제된 실험환경에서 측정하였으나, 본 연구는 이온화 장치가 설치된 장비의 차폐물 밖에서 방사선 노출량을 측정하여 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다. 예를 들면 이온화 장치의 개수가 많은 설비라도 장비와 차폐물이 설치된 거리가 멀어 측정위치가 발생원에서 멀어지면 이온화 장치의 개수의 영향보다는 차폐물의 구조 및 거리에 따른 영향이 더 컸기 때문인 것으로 판단된다.

LCD 제조 공정의 작업환경에 대한 관심은 반도체 제조 공정의 백혈병 발생으로 인해 유사한 공정을 보유한 LCD 공정에 대한 작업환경 평가도 필요하다는 점에서 시작되었다. 본 연구의 대상이 된 LCD 제조 공정의 방사선량을 기존 반도체 제조공정 연구 결과와 비교한 결과 노출되는 방사선 수준이 유사한 것으로 파악되었다. 본 연구의 LCD 제조 공정 장비에서 발생한 표면선량의 범위는 0.20 ~ 50.00 $\mu\text{Sv/h}$ 로 측정되었고, 박승현 등(2012)은 반도체 제조공정의 이온주입장비(임플란터) 등에서 발생한 표면선량의 범위를 0.15 ~ 42.30 $\mu\text{Sv/h}$ 으로 보고하여 본 연구의 범위와 유사하였다.

5.2. 극저주파자기장 노출특성에 대한 고찰

LCD 제조 공정 생산장비 및 고용량 전기설비에 대한 극저주파자기장 노출량을 평가 하였다. 먼저 극저주파자기장 개인 최대노출수준은 0.5 ~ 43.5 μT ($6.311 \pm 6.746 \mu\text{T}$)으로 나타났다. 극저주파자기장 개인 최대노출수준은 사업장, 사업장 라인, 생산 라인, 공정 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었으나, 근로자의 직무에 따라 순간적으로 노출되는 최대노출수준은 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다. TFT 공정 증착(depositon)장비에서 작업하는 엔지니어에게 노출되는 극저주파자기장 개인 최대노출수준(43.5 μT)이 가장 높았으며, 이는 ACGIH 노출기준(1 mT)의 약 4.35% 수준이었다. 오퍼레이터 중 가장 높은 극저주파자기장에 노출(10.5 μT)되는 근로자는 Module 공정에서 작업하는 근로자로 ACGIH 노출기준의 약 1.05 % 수준에 노출되는 것으로 파악되었다.

엔지니어와 오퍼레이터의 극저주파자기장 노출수준 차이는 작업의 특성 때문인 것으로 해석이 된다. 오퍼레이터는 장비 모니터를 통해 이상상태를 확인하거나 운전조건 조정 또는 제품 불량 검사업무 등 모니터 통해 주로 업무를 수행하였고, 엔지니어는 장비 이상 또는 고장 시 직접 장비를 수리하는 업무를 수행하여 극저주파자기장을 방사하는 설비에 좀 더 근접하여 작업하는 특성이 있었다.

LCD 사업장과 유사한 작업공정을 보유한 반도체 사업장도 공정엔지니어(123.2 μT), 장비엔지니어(109.4 μT)와 같은 엔지니어에게 노출되는 극저주파자기장 수준이 오퍼레이터(15.3 μT) 보다 높은 것으로 보고되었다(정은교 등, 2012). LCD 제조 공정은 장비의 대부분이 밀폐 및 차폐되어 있고 장비의 수리를 위해서는 전원을 차단한 후 장비에 접근할 수 있는 반면, 반도체 제조공정은 서비스 지역을 통해 차폐되지 않은 상태에서 운전 중인 장비에 접근 할 수 있는 차이점으로 인해 노출수준에 차이가 있는 것으로 판단되었다.

이렇듯 LCD 제조공정과 반도체 제조 공정 종사 근로자의 극저주파자기장 개인 최대노출수준은 각각 43.5 μT 와 123.2 μT 로 용접공의 극저주파자기장 개인 최대노출수준인 221.28 μT (정연준 & 홍승철, 2014) 보다는 낮은 것으로 나타났다.

극저주파자기장 개인 평균노출수준은 $0.565 \pm 0.134 \mu\text{T}$ 였으며, 사업장, 사업장 라인, 생산 라인, 공정 그리고 직무 간 통계적으로 유의한 차이 없는 것으로 나타났다. 극저주파자기장 개인 평균노출수준($0.565 \mu\text{T}$)은 개인 최대노출수준($6.311 \mu\text{T}$)에 비해 현저히 낮았다. 이는 근로자 극저주파자기장 노출패턴 확인 결과 근로자들은 작업시간 동안 지속적으로 일정한 수준의 극저주파자기장에 노출되는 것이 아니라 대부분 작업시간 동안 낮은 수준에 노출되며, 작업 특성에 따라 간헐적으로 높은 극저주파자기장에 노출되기 때문인 것으로 해석된다. 특히 근로자들은 장비 근처에서 상주하며 작업하는 것이 아니라 별도의 운영실 등에서 모니터를 통해 작업 공정을 모니터링 하며, 제품 교체를 위한 장비 조작이나 이상여부에 대한 조치가 필요한 경우에만 해당 장비 근처로 가서 작업을 수행하기 때문인 것으로 추정된다.

LCD 제조 공정 장비의 표면(3 cm 거리)에서 발생하는 극저주파자기장 노출량의 최댓값 범위는 $0.60 \sim 287.20 \mu\text{T}$ 으로 측정되었으며, 평균은 $8.183 \pm 0.517 \mu\text{T}$ 로 분석되었다. 총 16종의 장비 및 부대설비에 대해 극저주파자기장 노출수준 측정 결과 천장 레일($287.20 \mu\text{T}$)과 배전반($72.72 \mu\text{T}$)에서 가장 높은 극저주파자기장이 발생하였으며, 이는 ACGIH 노출기준인 1 mT의 약 28.72 %와 7.27 % 수준인 것으로 파악되었다.

공정 내 대부분의 장비는 차폐되어 있는 반면 천장 레일은 차폐 되어 있지 않았다. 그러나 차폐되어 있지 않은 천장 레일에서 발생하는 극저주파자기장 노출량이 높은 것은 차폐의 영향이 아닌 거리 때문인 것으로 판단되었다. 기존 연구에 따르면 자기장은 물질을 잘 통과하는 특성이 있어 차폐효과가 크지 않기 때문에(김기웅 등, 2016; 최학윤, 2011.), 차폐된 장비의 극저주파자기장 수준이 낮은 이유는 차폐효과라기보다는 차폐물 설치 시 차폐물 내로의 접근이 불가능하여 차폐물 표면에서 극저주파자기장을 측정하여 즉, 발생원으로부터 근로자 작업위치(측정 위치)가 일정 거리를 유지하였기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 배전반은 덮개가 설치되어 일부 차폐효과가 있을 수 있지만, 배전반은 근로자들이 수시로 이동하는 통로 벽에 주로 설치되 근로자 노출위치(측정위치)가 발생원에 가깝기 때문에 지역노출량이 상대적으로 높은 것으로 추정된다.

반면 LCD 제조 공정 장비에서 발생하는 극저주파자기장 노출량은 생산 라인 및 공정 간에는 통계적으로 차이가 있었다. Fab 라인($8.924 \mu\text{T}$) 공정인 TFT 공정($8.636 \mu\text{T}$), CF 공정 ($11.414 \mu\text{T}$), LC 공정($7.543 \mu\text{T}$) 장비의 극저주파자기장 노출량의 평균이 module 라인($4.641 \mu\text{T}$)보다 높은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 fab 라인의 장비가 module 라인 장비보다 대형화되어 있으며, 복잡·다양하고 그 수가(fab 라인 장비: 4,587개; module 라인 장비: 431개) 많고(김갑배, 2016) 장비와 근로자 이동 통로(측정 위치) 간 공간이 협소하기 때문으로 추정된다.

정은교 등은(2012) 국내 반도체 제조 공정 극저주파자기장 지역노출량의 최댓값을 $860.00 \mu\text{T}$ (3 cm 거리)로 보고하였으며 이는 본 연구의 LCD 제조 공정 극저주파자기장 지역노출량 최댓값($287.20 \mu\text{T}$) 보다 높은 것으로 나타났다. 이는 개인 노출수준

비교 시에도 설명 되었듯, 반도체 제조공정은 서비스 지역을 통해 차폐되지 않은 상태에서 운전 중인 장비에 접근 할 수 있는 차이점으로 인한 것으로 판단된다. 반도체 제조 공정에서는 확산공정과 이온주입공정의 장비, 분전반 전기판넬, 그리고 전선 등에서 높은 극저주파자기장이 발생되었고, LCD 사업장에서 비교적 높은 수준의 극저주파자기장을 발생시키는 장비는 천장레일과 배전반 등과 같은 부대설비인 것으로 파악되었다.

본 연구에서는 측정 거리에 따른 지역노출량의 변화를 확인하고자 일부 장비에 대해서는 3 cm, 10 cm, 30 cm 거리에서 극저주파자기장 노출량을 측정하였으며, 평균 노출량은 각각 53.274 μ T, 4.916 μ T, 1.346 μ T로 발생원으로부터 거리가 멀어질수록 극저주파자기장이 감소하는 것으로 확인할 수 있었다. 또한 측정 위치가 3 cm에서 10 cm로 멀어졌을 때는 극저주파자기장 노출량의 변화 수준에는 통계적으로 유의한 차이가 있었으나, 10 cm에서 30 cm 멀어졌을 때는 노출수준이 감소하였으나 통계적으로는 유의한 차이가 없었다. 이러한 결과는 거리의 제곱에 반비례하여 극저주파자기장이 감소한다고 보고(정은교 등, 2015)된 것과 유사한 경향을 보이긴 했으나, 역제곱 법칙에 정확히 부합한 수준으로 노출량이 감소하지는 않았다. 이는 통제된 환경이 아닌 여러 장비가 설치되어 있는 작업현장에서 측정한 결과이기 때문에 주변 장비에서 발생하는 극저주파자기장의 영향 등으로 인해 이론적인 결과 값과는 다소 차이가 있었던 것으로 추정된다.

본 연구는 반도체 제조 공정에 비해 연구가 비교적 수행되지 않았던 LCD 제조 공정 중에서 발생할 수 있는 전리방사선과 비전리방사선(극저주파자기장) 노출 수준을 파악한데 의의가 있다. 또한, LCD 제조 산업은 과거 우리나라가 세계적으로 높은 점유율을 차지하고 있었으나, 최근에는 중국 제조업체가 중국 정부의 보조금을 기반으로 급속히 성장하면서 국내 일부 LCD 제조 사업장은 사업철수를 일부는 생산라인 감축을 계획 중이다. 따라서 본 연구를 통한 평가 결과는 멀지 않을 미래에 없어지거나 축소 될 LCD 제조 공정에서의 전리방사선과 비전리방사선(극저주파자기장)의 근로자 과거 노출 수준을 파악을 위한 자료로 활용 될 수 있을 것이라 판단된다.

본 연구의 결과의 일반화를 위해 추가적인 후속 연구가 필요하다. 첫째, 본 연구는 LCD 제조사 2곳을 대상으로 정전기 제거장치에서 발생하는 방사선 및 각종 전자기장 발생장비에서 발생하는 극저주파자기장을 측정 및 분석하였다. 연구 결과를 일반화하기 위해서는 보다 많은 사업장 또는 라인에 대한 추가적인 방사선 및 극저주파자기장 측정을 통한 평가가 필요하다. 둘째 이온화 장치로 발생하는 방사선 측정 결과를 연간 방사선량으로 환산하기 위해서는 근로자들의 작업 시간 동안 방사선 노출 시간을 정확히 파악하는 것이 중요한데, 장비에 유리 기판 투입 시 이온화 장치 작동 시간은 10초 정도로 짧고, 이마저도 고정 된 장소에서 작동 하는 것이

아니며, 근로자 또한 장비에 상주하여 작업하지 않고 있어 근로자들이 방사선에 노출되는 시간을 작업 특성 분석 및 근로자 인터뷰를 통해 추정하였다. 연간 방사선량 평가 시 노출 시간이 중요한 변수 이므로 보다 정확한 평가를 위해서는 정확한 노출 시간이 파악된 데이터를 구축하여 적용하는 것이 필요하다. 마지막으로, LCD 제조 공정 종사 근로자의 직무 구분이 사업장에 따라 다르고, 동일한 직무라도 수행한 업무에 차이가 발생하며, 한 명의 근로자가 여러 가지 직무를 동시에 수행하는 경우가 있어 본 연구에서는 엔지니어와 오퍼레이터로 직무를 단순 분류하였다. 그러나 근로자 직무 간 노출수준의 정밀한 파악을 통해 건강 보호대책(예: 직무 순환)을 수립하기 위해서는 보다 정밀하고 세분화된 직무를 구분하여 개인 노출량을 측정 및 분석하는 것이 필요하다.

VI. 결 론

결론

본 연구는 LCD 제조 공정에서 발생할 수 있는 전리방사선 및 비전리방사선을 측정하고 노출특성을 분석하였다. 전리방사선 노출특성 파악을 위해 이온화 장치에서 발생하는 방사선 발생 수준을 측정하고 작업자의 방사선 노출 빈도 및 시간 등 노출 특성을 고려하여 연간 방사선량을 추정하여 원자력안전법의 연간 유효방사선량 기준과 비교하였고, 비전리방사선 노출특성 파악을 위해 각종 생산장비 및 고용량 전기설비에서 발생하는 극저주파자기장을 측정 및 분석하였다.

먼저 LCD사업장의 연간 방사선량은 측정을 실시한 총 83개의 장비 중 연간 방사선량이 1 mSv 이하로 평가된 장비는 81개로 97.6 %를 차지하였다. 그러나 연간 방사선량의 범위는 0.004 mSv ~ 2.167 mSv로 나타나 장비에 따라 방사선 노출수준의 차이가 큰 것으로 파악되었다.

연간 방사선량이 1 mSv를 초과하는 2개의 장비는 rubbing기와 coater기로 파악되었으며 이들 장비로부터 발생하는 방사선 수준이 다른 장비에 비해 높은 원인을 분석한 결과, 완벽히 차폐 되지 않고 장비의 일부분이 개방되어 있거나, 차폐물 이음새 사이에 틈이 있거나 또는 차폐재의 두께가 충분하지 않는 등 장비에 대한 차폐가 충분하지 않을 때 노출 수준이 높은 것으로 나타났다.

연간 방사선량이 1 mSv를 초과한 두 장비에 대해서는 차폐물을 보완하는 개선 대책을 적용하였는데, 개선 전에는 연간 평균 방사선량이 1.604 mSv (SE = 0.564)로 평가 되었으나, 차폐 보완 후에는 연간 평균 방사선량이 0.126 mSv (SE = 0.109)로 현저히 낮아졌다. 이러한 결과를 고려할 때 이온화 장치로부터 발생하는 방사선 수준을 낮추기 위해서는 차폐물에 개방된 부분이 없고 차폐재 이음새를 견고히 하여 방사선 누출이 없도록 밀폐하여 관리하는 것이 중요하며, 차폐물의 재질 및 두께를 충분히 고려하여 방사선 노출수준을 관리하는 것이 필요함을 시사하고 있다.

LCD 제조 공정 장비에서 발생하는 극저주파자기장에 노출되는 근로자들의 작업 시간 동안의 개인 평균노출수준은 0.565 μ T(SE = 0.015)로 나타났으며, 측정 결과 값의 최댓값을 기준으로 한 개인 최대노출수준의 평균은 6.311 μ T(SE = 0.754), 노출수준의 범위는 0.50 μ T ~ 43.50 μ T로 측정되었다. 근로자의 극저주파자기장 개인노출수준은 사업장, 사업장 라인, 생산 라인, 공정 간 통계적으로 유의한 차이가 없었으나, 직무에 따른 극저주파자기장 개인 최대노출수준은 통계적으로 차이가 있는 것으로 나타났다. 엔지니어가 오퍼레이터보다 높은 수준의 극저주파자기장에 노출되었으며, 엔지니어 중에서 가장 높은 수준에 노출된 근로자는 TFT공정 deposition 장비 작업자인 것으로 파악되었다. 이러한 직무에 따른 노출수준의 차이

는 오퍼레이터보다 엔지니어가 수리 등을 위해 장비 인근에 상대적으로 오래 머물면서 작업하기 때문인 것으로 추정된다.

한편, 장비에서 발생하는 극저주파자기장 지역노출량 수준의 평균은 $8.183 \mu\text{T}$ (SE = 0.517), 최댓값은 $287.20 \mu\text{T}$ 로 측정되었다. 높은 수준의 지역노출량이 측정된 장비는 천장레일과 배전반 등 부대설비였다. 직접 제품을 생산하는 장비 보다 천장레일, 배전반에서 높은 수준의 지역노출량이 측정된 것은 대부분의 생산 장비는 차폐되어 있었던 반면, 천장레일과 배전반 등은 차폐되어 있지 않거나 근로자 이동통로 및 작업공간과 좀 더 가까운 위치에 있어 극저주파자기장 발생원에 상대적으로 가까웠기 때문으로 추정된다. 또한, 극저주파자기장 측정 시 장비로부터 측정 거리를 달리 하여 측정한 결과 발생원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 극저주파자기장 지역노출량이 현저히 감소하는 경향을 확인하였다. 이러한 결과는 극저주파자기장 노출수준 감소를 위해서는 극저주파자기장 발생원으로부터 근로자들의 작업 장소를 최대한 이격하여 관리하는 것이 필요함을 시사하고 있다.

참 고 문 헌

[국내 문헌]

- 고용노동부. 산업안전보건기준에 관한 규칙. 2022a; p. 938
- 고용노동부. 산업안전보건법 시행규칙 [별표 22]. 2022b; p. 592-597
- 고용노동부. 화학물질 및 물리적인자의 노출기준(고용노동부고시 제2020-48호, 2020.1.14). 2020; p. 1
- 과학기술정보통신부. 전자파인체보호기준(과학기술정보통신부고시 제2017-7호, 2017.8.24.). 2017. p. 2-3
- 국립전파연구원. 전자파강도 측정기준(국립전파연구원고시 제2017-7호, 2017.8.4.) 2017. p. 2
- 김갑배, 정은교, 강준혁, 김기웅. 전자산업 생산설비의 극저주파자기장 노출 특성. 산업안전보건연구원 보고서. 2016. p. 1-42
- 김기웅, 정은교, 박승현, 김갑배, 이광용, 박해동, 서회경, 강준혁, 김성호, 노지원, 황은송. LCD 제조공정 유해요인 특성연구(Ⅲ). 산업안전보건연구원 보고서. 2016. p. 6, 27-40, 197-210, 220-237
- 김수근. 유해인자에 의한 건강영향과 관리(방사선). 산업안전보건연구원 보고서. 2006.
- 김준범, 강준혁, 정은교, 정기효. LCD 제조공정 종사근로자의 극저주파자기장 노출 특성 연구. 한국산업보건학회지 2022;32(1):10-20
(<http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2022.32.1.10>)
- 김준범, 정은교, 정기효. LCD 제조공정의 이온화 장치에 대한 전리방사선 지역노출 특성 분석. 한국산업보건학회지 2021;31(4):342-352
(<http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2021.31.4.342>)
- 김창균. 방사선계측학. 신광출판사. 2007. p. 105-125
- 도경현. 저선량 방사선이 인체에 미치는 영향. 대한의사협회지 2011;54(12): 1253-1261 (<http://dx.doi.org/10.5124/jkma.2011.54.12.1253>)
- 류권홍. 방사선 안전규제에 관한 법제도 비교 분석. 한국법제연구원. 2017. p. 5
- 문재동, 전형준, 김영욱, 이철호, 채창호, 김지홍, 김수근, 진영우, 강동목, 박정선, 김은아, 고상백, 이용진, 이경종, 사공준, 김양호, 유철인, 이지호, 이현, 임상혁, 우종민, 임종한, 홍윤철, 이철갑, 김성아, 권영준. 문제해결형 직업성 질환 진단 매뉴얼 개발연구. 산업안전보건연구원 보고서. 2003. p. 434-436
- 박승현, 정은교, 신정아, 이광용, 박해동, 이나루, 박현희, 권지운, 서회경, 김갑배, 정광재. 반도체 제조 사업장에 종사하는 근로자의 작업환경 및 유해요인 노출특성 연구. 산업안전보건연구원 보고서. 2012. p. 121-126

- 손미아, 백도명, 박미진, 이원규, 임연호, 김현, 윤재원. 전자산업의 보건관리 실태조사 및 노동자 보호방안 마련-반도체 제조업 중심. 산업안전보건연구원 보고서. 2018. p. 150-152
- 신영진, 최해경, 류제환. 전자과 인체안전 이슈 조사 연구. 국립전파연구원. 2016; p. 4-19
- 원자력안전위원회. 원자력안전법 시행령. 2021. p. 29~30, 44
- 이수환, 이동훈. 선량 중첩을 이용한 멀티형 연 X-선 정전기 제거장치의 개발. 한국안전학회지 2018;33(2):28-31 (<https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2018.33.2.28>)
- 정연준, 홍승철. 일부 용접공의 극저주파 자계노출평가. 한국산업위생학회지 2014;24(4):509-517 (<http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2014.24.4.509>)
- 정은교, 김갑배, 송세욱. 전리방사선 노출과 관리. 한국산업보건학회지 2015;25(1):27-35 (<http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2015.25.1.27>)
- 정은교, 김갑배, 정광재, 이인섭, 유기호, 박정선. 반도체 제조 근로자의 극저주파 자기장 노출 평가. 한국산업위생학회지 2012;22(1):42-51
- 정은교, 노지원, 장미연, 김기웅. LCD 제조업 작업환경관리 매뉴얼 개발 연구. 산업안전보건연구원 보고서. 2017. p. 9-90
- 정필훈, 이동훈. 완전차폐 및 이온조절형 연X선식 정전기제거장치의 개발. 한국안전학회지 2016;31(5):22-27 (<https://dx.doi.org/10.14346/jkosos.2016.31.5.22>)
- 초록방사선(Image Green). 방사선과 압과의 관계. 의료방사선안전문화연합회 [accessed 2022 May 11] Available from: URL: www.imagegreen.org/info4/index.html?sgubun=1
- 최학운. 교류자기장 차폐를 위한 자기장 상쇄장치 모델의 설계. 조명전기설비학회논문지 2011;25(7):78-82
- 한국보건의료연구원. 방사선이 인체에 미치는 영향: 일본 원전사고로 인한 영향의 관점에서. 2011. p. 9

[국외 문헌]

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). TLVs® and BEIs® based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices. 2020; p. 136-139
- Cember H. Introduction to Health Physics, Northwestern University, 2nd ed. Pergamon Press. 1983.
- Daniel AG. Basic Radiation protection technology, 2nd ed. Pacific Radiation Corporation, Ergmon Press. 1992. p. 21-124
- Deadman JE, Infante-Rivard C. Individual estimation of exposures to extremely low frequency magnetic fields in jobs commonly held by women. American Journal of Epidemiology 2002;155(4):368-378(<http://doi.org/10.1093/aje/155.4.368>)

- Deltour I. Trends in Brain Tumor Incidence Rates in Denmark, Finland, Norway, and Sweden, 1974 ~2003. *J Natl Cancer Inst* 2009;101:1721-1721
- Draper G, Vincent T, Kroll ME, Swanson J. Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *BMJ* 2005;330(7503):1290-1295
(doi:10.1136/bmj.330.7503.1290)
- International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans, agents classified by the IARC monographs volumes 1-129 [accessed 2021 Oct 29] Available from: URL:<https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/>
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields(up to 300 GHz). *Health Physics* 1998;4(4):494-522
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields(1 Hz - 100 kHz). *Health Physics* 2010;99(6):818-836
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Principles for Non-Ionizing Radiation Protection. *Health Physics* 2020;118(5):477-482
- Izabel M, Mateus H, Nelson G. Extremely low-frequency magnetic fields and health effects: literature review. *Rev Bras Epidemiol Hyg* 2009;12(2):1-19
- Kheifets L. Electric and magnetic field exposure and brain cancer: A review. *Bioelectromagnetecs*. 2001;22(S5)S1-S3
- Kheifets LI, Gilbert ES, Sussman SS, Guenel P, Sahl JD, Savitz DA and Theiault G. Comparative analyses of the studies of magnetic fields and cancer in electric utility workers: studies from France, Canada, and the United States. *J Occup Environ Med*. 1999;56(8):567-574
- Li CY, Sung FC, Chen PC, Silva M, Mezei G. Extremely-Low-Frequency Magnetic Field Exposure of Children at Schools near High Voltage Transmission Lines. *The Sci the Total Environ* 2007;376:151-9
- Lowenthal RM, Tuck DM, Bray IC. Residential exposure to electric power transmission lines and risk of lymphoproliferative and myeloproliferative disorders: a case-control study. *Intern Med J* 2007;37(9):614-619
(doi:10.1111/j.1445-5994.2007.01389.x)
- National Institute of Environmental Health Science, National Institute of Health (NIEHS/NIS). Electric and magnetic fields associated with the use of electric power. 2002. p. 39

National Institutes of Health(NIH). Electric and Magnetics Fields Associated with the Use of Electric Power. NIEHS/DOE EMF RAPID Program. 2002.

Olsen JH, Nielsen A, and Schulgen G. Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children. Brit Med J 1993;307;891-895

Repacholi M. What advice to give when elf is classified as a possible human carcinogen [accessed 2021 Oct 29] Available from: URL:https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/115/37115829.pdf

United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation(UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2008 Report; Volume 1(Annex B). United Nations. 2010. p. 237-238

Abstract

A Study on the Ionizing and Non-ionizing Radiation Exposure Characteristics in LCD Manufacturing Process

Joonbeom Kim

Objectives: The aim of this study is to analyze the local exposure levels of radiation from the soft X-ray ionizers used to eliminate static electricity and to evaluate personal and local exposure levels of the extremely low frequency magnetic fields(ELF-MF) emitted from various electric equipment in Liquid Crystal Display(LCD) manufacturing company.

Methods: In this study, measurements of radiation and ELF-MF were respectively performed at two fabrication lines and one module line of two domestic LCD manufacturing companies. However radiation measurements from the soft X-ray ionizers were not performed at one of module lines because the line used ion bars to eliminate static electricity instead of soft X-ray ionizers.

Various number(from 1 to 64) of ionizers were installed at equipment of the diverse processes. Direct reading equipment was used to measure the local radiation levels from ionizers. The measurement results($\mu\text{Sv/hr}$) were converted into annual effective dose(mSv/yr) by considering workers' exposure time to the radiation.

ELF-MF exposure levels from the electronic facilities were measured with two types of equipment, one for personal exposure levels and the other for local exposure levels. For personal sampling, samplers were installed to workers while they were working. For local sampling, exposure levels were measured at 3 cm, 10 cm, and 30 cm away from the electronic facilities with direct reading equipment. The measurement results were evaluated to average and maximum(ceiling) values to identify personal and local exposure levels. Statistical analyses were performed to investigate the radiation and the ELF-MF exposure characteristics.

Results: Annual radiation doses less than 1 mSv were 97.6% among measurement results from the equipment installed ionizers. However, the range of annual radiation exposure level was 0.004 mSv ~ 2.167 mSv, which implied a large variation among the equipment. Statistical analyses of the measurement results

found that this large variation happened due to insufficient shielding of the equipment rather than equipment characteristics. In order to understand this difference in more detail, improvement measures such as shielding of the equipment were implemented with an annual radiation dose over 1 mSv. As a result, the average annual radiation dose decreased from 1.604 mSv to 0.126 mSv after shielding improvement. The highest annual radiation dose before the implementation of the radiation reduction measures was 2.167 mSv, which did not exceed the annual effective dose limit of the Nuclear Safety Act of 50 mSv(annual average of 20 mSv).

Personal exposure levels of workers exposed to ELF-MF from LCD manufacturing process equipment were analyzed based on the average and maximum values of the measurement results. The average personal exposure level to ELF-MF during working hours was $0.565 \mu\text{T}$ (SE = 0.015), and the average personal maximum exposure level was $6.311 \mu\text{T}$ (SE = 0.754), and the range of exposure level was $0.5 \mu\text{T}$ to $43.5 \mu\text{T}$. The highest ELF-MF level of $43.5 \mu\text{T}$ was 4.35 % of ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists) exposure limit value(1 mT). Statistical analyses of the study found that personal maximum exposure level of ELF-MF according to the job was significantly higher for engineers than for operators. It is presumed that this is because engineers, rather than operators, stay the equipment for a relatively long time for repairs, etc. The average local exposure to ELF-MF was analyzed to be $8.183 \mu\text{T}$ (SE = 0.517). As a result of measuring the ELF-MF exposure level for a total 16 types of equipment and ancillary facilities, the high ELF-MF was generated in the roof($287.20 \mu\text{T}$) rail and electric panel($72.72 \mu\text{T}$), which was found to be about 28.72 % and 7.27 % of the ACGIH exposure limit of 1 mT. Lastly, The ELF-MF exposure level was measured at 3 cm, 10 cm, 30 cm distances for some equipment to identify the local EMF-MF exposure level vary according to the distance. The average ELF-MF exposure level according to the distance was $53.274(3 \text{ cm}) \mu\text{T}$, $4.916 \mu\text{T}(10 \text{ cm})$, $1.346 \mu\text{T}(30 \text{ cm})$ respectively, and it was confirmed that the ELF-MF level decreased as the distance from the source increased.

Conclusions: Through this study, it was found that the shielding was not complete or the thickness of the shielding material was insufficient for the equipment whose radiation level was rated somewhat higher than other equipment. This means that sufficient shielding of equipment is an important engineering improvement measure that can be utilized in the workplace to reduce radiation exposure levels. For ELF-MF exposure characteristic, it was found that the local

exposure level decreased sharply as the distance from the electromagnetic field generating equipment increased. As a result of this study, the ELF-MF generated from the LCD manufacturing process equipment did not exceed the exposure limit, but in order to protect the health of workers, it is recommended that workers work as far away from the ELF-MF generating equipment as possible.

Key words: LCD manufacturing company, ionizer, radiation, extremely low frequency magnetic fields(ELF-MF), exposure level