

LCD 제조과정 종사근로자의 극저주파자기장 노출특성 연구

김준범^{1,3} · 강준혁¹ · 정은교² · 정기호^{3,4*}

¹한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원, ²(주)한국산업보건연구소,
³울산대학교 안전보건전문학과, ⁴울산대학교 산업경영공학부

A Study on the Extremely Low Frequency Magnetic Fields Exposure Characteristics of Workers in LCD Manufacturing Process

JoonBeom Kim^{1,3} · Joon Hyuk Kang¹ · Eun-Kyo Chung² · Kihyo Jung^{3,4*}

¹Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

²Korea Institute for Occupational Health, KIOH

³Department of Safety and Health, University of Ulsan

⁴School of Industrial Engineering, University of Ulsan

ABSTRACT

Objectives: The aim of this study is to evaluate exposure levels of the extremely low frequency magnetic fields(ELF-MF) radiated from various electric facilities in Liquid Crystal Display(LCD) manufacturing processes.

Methods: This study measured the exposure levels of personal and local ELF-MF for the electronic facilities installed in two LCD manufacturing companies. Samplers were installed around workers' waist during working hours to identify personal exposure levels, and direct reading equipment were located at 3 cm, 10 cm, and 30 cm away from the surface of the electronic facilities to measure local exposure levels. Average and maximum(ceiling) values were calculated for personal and local exposure levels.

Results: Average and maximum of personal exposure levels for each worker were $0.56(\text{mean}) \pm 0.02(\text{SE}) \mu\text{T}$ and $6.31 \pm 0.75 \mu\text{T}$, respectively. Statistical analyses of the study found that maximum of the personal exposure levels for engineers was significantly higher than that for operators since engineers spend more time near the electronic facilities for repairing. The range of maximum personal exposure levels was $0.50 \sim 43.50 \mu\text{T}$ and its highest level was equivalent to 4.35 % of ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists) exposure limit value(1 mT). Maximum of local exposure levels was $8.18 \pm 0.52 \mu\text{T}$ and the electronic facilities with higher exposure levels were roof rail and electric panel, which were not related to direct manufacturing. The range of maximum local exposure levels was $0.60 \sim 287.20 \mu\text{T}$ and its highest level was equivalent to 28.7 % of the ACGIH exposure limit value. Lastly, the local exposure levels significantly decreased as the measurement distance from the electronic facilities increased.

Conclusions: Maximum of personal and local exposure levels did not exceed the exposure limit value of ACGIH. However, it is recommended to keep the workers as far as possible from the sources of ELF-MF.


Key words: LCD manufacturing company, extremely low frequency magnetic fields, exposure level, work distance


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


93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan

Received: November 8, 2021, Revised: December 20, 2021, Accepted: February 10, 2022

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

 Joon Hyuk Kang <http://orcid.org/0000-0002-5416-7709>

 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.

I. 서 론

극저주파자기장(Extremely low frequency magnetic field)은 비전리방사선 중에서 유일하게 백혈병과 관련이 있는 것으로 알려지고 있다. 극저주파자기장은 소아 백혈병과 관련이 있다는 연구결과가 발표되면서 극저주파자기장의 발암성이 주목받기 시작했다(Izabe et al., 2009). 그러나 ICNIRP(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 1998) 및 IARC(International Agency for Research on Cancer, 2000) 등이 수행한 연구에서 ICNIRP 가이드라인(60 Hz에서 83.3 μ T) 이하의 극저주파자기장에 노출될 경우 건강영향이 있는지 명확한 결론을 내지 못했다. 한편, 역학연구(ICNIRP, 1998. Repacholi, 2021)는 평균 0.3 ~ 0.4 μ T 이상의 자기장에 노출된 소아에서 백혈병 발생위험이 높다는 연구결과를 발표하였다. 또한, Draper et al.(2005)은 송전선로에서 200 m 내에 사는 아동의 백혈병 위험도가 증가하는 것을 발견하였으며, Lowenthal et al.(2007)은 성인도 송전선로에서 50 m 내에 살고 있을 경우 300 m 밖에 사는 경우보다 백혈병 발생 위험이 높은 것으로 보고하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(IARC)는 2002년 극저주파자기장을 2B 등급(인체 발암 가능 물질)으로 분류하였다(IARC, 2021).

사업장의 근로자는 전기기기, 장비, 그리고 전력공급 장치에서 발생하는 자기장에 노출되고 있는 것으로 보고되고 있다. 용접공의 극저주파자기장 노출수준은 중앙값(median)이 0.95 μ T로 조사되었으며(NIEHS, 2002), 보다 최근에 조사된 Chung(2012)에 따르면 용접작업의 극저주파자기장 노출수준은 3.46 μ T로 알려지고 있다. 한편, 극저주파자기장의 평균 노출수준이 0.23 μ T 이상인 직업에는 제빵사, 계산원, 조리사, 전기 작업자, 재봉틀 작업자 및 방직기계 작업자가 있는 것으로 파악되고 있다(Deadman & Infante-Rivard, 2002). 조립공장의 전기작업자(0.70 μ T), 섬유공장의 재봉틀 작업자(0.68 μ T), 그리고 신발공장 작업자(0.66 μ T)는 극저주파자기장 노출이 상대적으로 높은 것으로 조사되었다. 마지막으로, 사무실의 자기장 노출수준은 0.05 ~ 0.4 μ T로 가정에서 발생하는 수준과 유사하지만 특정 장비 인근에서 간헐적으로 노출수준이 급증한다는 보고도 있다(NIEHS, 2002).

우리나라의 경우도 최근 들어 극저주파자기장을 발생

시키는 LCD(Liquid Crystal Display)와 반도체 제조 공정에서 근무한 근로자에 대해 산업재해를 인정하고 있다. 예를 들면, 2013년 ~ 2018년 6월까지 직업성 암인 백혈병으로 산업재해 인정을 받은 사례 중에서 총 3건(반도체 2명, LCD 1명)은 법원·근로복지공단에서 직업성 암의 주요 유해인자로 비전리방사선을 인정하였다(Lim, 2018). 그 이유는 LCD 및 반도체 제조라인은 초정밀 기기 및 분석 장비 등이 집적된 일괄 공정으로 이루어져 있으며, 전기적인 위험 인자로 고전압과 고전류를 사용하는 설비가 많아 전자기장 발생이 문제가 될 수 있기 때문으로 해석된다.

본 연구는 암 발생과 관련하여 비전리방사선 중 특히 논란이 되고 있는 극저주파자기장에 대해 LCD 제조공정의 노출량을 파악하였다. LCD 제조공정은 대형·고출력 초정밀 기기 등이 한정된 공간에 밀집되어 있고 고전압과 고전류 사용으로 전자기장 발생이 문제가 될 수 있다. 따라서 본 연구는 LCD 제조공정에서 사용하는 각종 생산설비 및 고용량의 전기설비에서 발생하는 극저주파자기장에 대한 개인노출량 및 지역노출량을 측정 및 분석하였다. 본 연구의 결과는 LCD 제조공정의 극저주파자기장 노출 실태를 파악하고 극저주파자기장으로부터 근로자의 건강을 보호하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

II. 연구 대상 및 방법

1. 연구 대상

본 연구는 국내 LCD 제조사 2곳(이하, A사와 B사)의 가공(fabrication) 라인과 모듈(module) 라인을 대상으로 하였다. 가공 라인은 박막트랜지스터(thin film transistor, TFT) 및 컬러필터(color filter, CF) 유리 기판에 설계패턴을 완성하고 액정을 주입하여 합착(liquid crystal, LC)하여 중간제품을 생산한다. 모듈 라인은 가공 라인에서 가공된 중간제품에 편광판이나 광원 등을 부착 및 조립하여 최종적으로 LCD 제품을 생산한다. 본 연구는 참여한 LCD 제조사에서 가장 오래된 가공라인 각 1개씩(이하, A-1라인과 B-1라인)과 2000년대 중반에 가동을 시작한 가공라인 각 1개씩(이하, A-2라인과 B-2라인), 그리고 모듈라인 각 1개씩(이하, A-Module과 B-Module)을 연구대상으로 선정하였다. A-1라인과 B-1라인은 각 1998년과 2002년 양산을 시작했고 생산하고 있는 디스플레이의 크기는 각

590 × 670 mm와 1,100 × 1,300 mm로 조사되었다. A-2라인과 B-2라인은 2004년에 양산을 시작했고 생산하고 있는 디스플레이의 크기는 각 1,500 × 1,850 mm와 1,870 × 2,200 mm으로 나타났다. LCD 제조사의 가공 라인 및 모듈 라인에서 사용되는 전자기장 발생장치(생산 설비, 고용량 전기설비 등)의 대부분은 극저주파자기장(1 ~ 300 Hz)에 해당하는 60 Hz 대역의 장치로 구성되어 있는 것으로 파악되었다.

2. 연구 방법

본 연구는 사업장, 생산 라인, 공정, 그리고 직무에 따른 극저주파자기장 노출량을 파악하기 위해 개인노출량과 지역노출량을 측정하였다(Table 1 참조). 먼저, 개인노출량은 작업근로자 허리 부위에 Emdex lite (Eneritech consultants Inc. Patterson, CA, USA)를 착용하여 작업시간 동안 연속 측정되었다. 본 연구에 사용된 Emdex lite는 standard field용 5대(sample rate = 4초)와 high field용 5대(sample rate = 4초)였다. Standard field용 측정기의 측정 범위는 0.01 μT ~ 300 μT, 분해능(resolution)은 0.01 μT, 측정 주파수 범위는 40 ~ 800 Hz였다. High field 측정기의 측정 범위는 0.5 μT ~ 7 mT, 분해능은 0.5 μT, 측정 주파수 범위는 40 ~ 1,000 Hz이었다. 본 연구에 사용된

standard field용과 high field용의 측정 범위는 LCD 공정과 유사한 반도체 공정의 최고노출량인 123.20 μT(Chung et al., 2012)보다 큰 것으로 나타났다. 한편, 본 연구는 근로자의 직무에 따라 개인노출량의 차이를 분석하기 위해 근로자의 직무를 두 종류(엔지니어, 오퍼레이터)로 분류하였다. 엔지니어(테크니션)는 생산 라인의 설비에 이상이 있거나 고장이 발생했을 때 직접 수리하는 근로자이며, 오퍼레이터는 설비의 모니터를 통해 이상상태 확인, 운전조건 조정, 제품 불량 검사업무를 수행하는 근로자로 정의되었다. 마지막으로, 본 연구는 B사의 경우 ROS(remote operation system) 룸에서 모니터를 통해 진도관리 및 전산관리 등의 업무를 수행하는 근로자의 노출량을 생산 라인 근무자의 노출량과 비교하기 위해 근로자의 작업위치 및 출입구 근처에서 개인노출량 측정기를 사용하여 극저주파자기장 노출량을 측정하였다.

본 연구는 설비에 따른 노출량 분석을 위해 설비의 극저주파자기장 지역노출량을 측정하였다. 지역노출량은 3축 등방성 프로브(100 cm³)가 부착된 ELT-400 (Narda safety test solution, Germany) 1대를 사용하여 측정되었다. ELT-400의 측정범위는 최대 80 mT 까지이고 측정 주파수 범위는 1 Hz ~ 400 kHz 였다. 측정에 사용한 장비는 극저주파자기장을 측정하기 전에

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

Company	Production line	Main process	Number of personal measurement	Number of equipment		
				Equipment type	Measured equipment	Measurement spots
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-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-Module	Module	5	2	4	101	
ROS room	ROS room	4	1	1	1	
Total			80	16	99	1,316

교정을 실시하였다. 지역노출량 측정은 기본적으로 설비에서 3 cm 떨어진 거리에서 파워케이블, 모터, 모니터, 배전반 등 설비의 여러 지점을 측정하였으며, 3 cm 거리에서 측정했을 때 다소 높은 수준(약 5 μT)을 나타낸 설비에 대해서는 측정 거리에 따른 효과를 평가하기 위해 추가적으로 10 cm, 30 cm 떨어진 거리에서 측정을 실시하였다.

우리나라의 극저주파자기장 강도기준(과학기술정보통신부의 전자파인체보호기준)은 일반인의 경우 83.3 μT (5/f, f=0.06 kHz)이고 직업인의 경우 416.6 μT (5/f, f=0.06 kHz)로 설정되어 있다(Ministry of Science and ICT, 2017). 한편, ICNIRP는 0.06 kHz에서 일반인의 노출기준을 200 μT 으로 제시하고 있으며, 직업인의 노출기준을 1,000 μT (1 mT)으로 명시하고 있다(ICNIRP, 2010). 한편, 영국, 독일, 스웨덴, 핀란드, 스페인, 호주, 뉴질랜드 등은 ICNIRP(2010) 기준과 동일한 기준을 준용하고 있다(National Radio Research Agency, 2016).

고용노동부에서는 근로자의 건강보호를 위해 고동노동부고시로 유해인자의 노출 기준을 규정하고 있으나 노출기준이 규정되지 않은 유해인자의 노출기준은 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)의 노출기준(Threshold Limit Values, TLVs)을 준용하도록 하고 있다(Ministry of Employment and Labor, 2020). 극저주파자기장의 노출기준은 고용노동부고시에 규정되어 있지 않아 본 연구의 측정결과는 ACGIH 노출기준과 비교하였다. ACGIH의 기준은 최대값(Ceiling value)으로 다음 식에 의한 값을 초과하지 않도록 하고 있다(ACGIH, 2020). 따라서 본 연구는 LCD 제조 사업장의 가공 라인 및 모듈 라인에서 사용되는 주파수 대역(60 Hz)을 고려하여 극저주파자기장의 최대값이 1 mT(10 G)를 초과하는지 여부를 평가하였다.

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

여기서, f : 주파수(Hz)

B_{TLV} : 자속밀도(mT)

3. 데이터 처리 및 통계 분석 방법

본 연구는 개인노출량 측정에 사용한 Emdex lite에 저장된 측정값을 전용 프로그램인 EMCAL 2007를 사

용하여 컴퓨터로 다운받아 분석하였다. Standard field용 Emdex lite의 분해능은 0.01 μT 이나, high field용 Emdex lite의 분해능은 0.5 μT 로 0.5 μT 이하의 값은 모두 0.5 μT 로 저장된다. 따라서 standard field용 측정기로 측정한 결과 값의 평균이 동일한 작업에 대해서 high field용 측정기로 측정한 값의 평균보다 과소 평가된다. 본 연구는 이러한 측정기의 분해능에 따른 영향을 제거하기 위해 standard field용 측정기로 측정한 결과 값 중에서 0.5 μT 이하 값을 0.5 μT 로 처리하여 분석하였다. 한편, 설비에서 발생하는 극저주파자기장의 지역노출량을 파악을 위해 사용한 ELT-400은 직독식 장비로서 측정값은 별도의 기록지에 수기로 정리하여 분석하였다.

개인노출량과 지역노출량에 대한 기초통계량은 산술 평균(arithmetic mean, AM), 표준편차(standard deviation, SD), 표준오차(standard error, SE) 범위(range)로 분석되었고, 데이터가 정규성을 충족하지 않아 기하평균(geometric mean, GM)과 기하표준편차(geometric standard deviation, GSD)도 분석하였다. 본 연구의 통계 검정은 PASW(v24.0, IBM)를 사용하여 이루어졌다. 통계 분석의 유의수준은 0.05를 적용하였으며, 통계 검정은 데이터의 특성에 따라 t검정, paired-t검정, 그리고 일원분산분석을 적용하였다.

III. 결 과

1. 개인노출량

1) 최대노출량

근무 환경(사업장, 생산 라인, 공정, 그리고 직무)에 따른 근로자 개인의 최대노출량은 Table 2와 같이 측정되었다. 먼저, 사업장에 따른 근로자의 개인 최대노출량(A사: 6.66 ± 1.10 (mean \pm SE) μT , B사: 5.97 ± 1.04 μT)은 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다($t(78) = 0.455$, $p = 0.651$). 한편, 생산 라인에 따른 개인 최대노출량은 근소한 차이로 통계적 유의성이 없는 것으로 분석되었다($t(2, 77) = 2.971$, $p = 0.057$). Fab 라인 근로자의 개인 최대노출량은 7.21 ± 0.91 μT 로 가장 높았고, 그 다음으로 Module 라인 3.49 ± 0.87 μT , 그리고 ROS Room 1.25 ± 0.48 μT 로 나타났다.

공정에 따른 개인 최대노출량은 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다($t(3, 72) = 1.638$, $p =$

Table 2. Personal maximum exposure level to extremely low frequency magnetic field

Classification		Number of workers	ELF-MF maximum value(μ T)						p-value
			AM	SD	SE	GM	GSD	Range	
Company	A	39	6.66	6.90	1.10	4.27	2.62	0.68~29.50	0.651
	B	41	5.97	6.69	1.04	4.35	2.23	0.50~43.50	
Production line	Fab	63	7.21	7.20	0.91	5.27	2.16	1.04~43.50	0.057
	Module	13	3.49	3.14	0.87	2.56	2.21	0.68~10.50	
	ROS room	4	1.25	0.96	0.48	0.98	2.25	0.50~2.50	
	TFT	23	8.33	8.81	1.84	5.96	2.24	1.50~43.50	
Main process	CF	13	5.37	4.52	1.25	3.99	2.24	1.04~16.50	0.188
	LC	27	7.15	6.77	1.30	5.43	2.04	1.50~29.50	
	Module	13	3.49	3.14	0.87	2.56	2.21	0.68~10.50	
Job	Engineer	51	7.73	7.90	1.11	5.37	2.34	0.68~43.50	0.035*
	Operator	25	4.23	2.55	0.51	3.49	1.94	1.04~10.50	
Total		80	6.31	6.75	0.75	4.31	2.41	0.50~43.50	-

※ AM : arithmetic mean, SD : standard deviation, SE : standard error, GM : geometric mean, GSD : geometric standard deviation
* $p < 0.05$

0.1885). 개인 최대노출량은 TFT 공정($8.33 \pm 1.84 \mu$ T)과 LC 공정($7.15 \pm 1.30 \mu$ T)이 상대적으로 높았고, 그 다음으로 CF 공정($5.37 \pm 1.25 \mu$ T)과 Module 공정($3.49 \pm 0.87 \mu$ T) 순이었다.

직무에 따른 개인 최대노출량은 통계적으로 유의하게 차이가 있는 것으로 분석되었다($t(74) = 2.150, p = 0.035$). 엔지니어의 개인 최대노출량은 $7.73 \pm 1.11 \mu$ T로 오퍼레이터의 개인 최대노출량인 4.23 ± 0.51

μ T보다 높은 것으로 파악되었다.

2) 평균노출량

근무 환경(사업장, 생산 라인, 공정, 직무)에 따른 근로자의 개인 평균노출량은 Table 3과 같이 측정되었다. 개인 평균노출량은 사업장, 생산 라인, 공정, 그리고 직무에 따라 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 분석되었다.

Table 3. Personal average exposure level to extremely low frequency magnetic field

Classification		Number of workers	ELF-MF average value(μ T)						p-value
			AM	SD	SE	GM	GSD	Range	
Company	A	39	0.59	0.17	0.03	0.57	1.25	0.50~1.42	0.088
	B	41	0.54	0.07	0.01	0.54	1.12	0.50~0.81	
Production line	Fab	63	0.57	0.14	0.02	0.56	1.21	0.50~1.42	0.618
	Module	13	0.56	0.95	0.26	0.56	1.17	0.50~0.79	
	Ros room	4	0.50	0.13	0.02	0.50	1.00	0.50~0.50	
	TFT	23	0.60	0.20	0.04	0.58	1.27	0.50~1.42	
Main process	CF	13	0.58	0.14	0.04	0.57	1.23	0.50~0.97	0.505
	LC	27	0.54	0.08	0.01	0.53	1.13	0.50~0.81	
	Module	13	0.56	0.95	0.03	0.56	1.17	0.50~0.79	
Job	Engineer	51	0.58	0.16	0.02	0.57	1.22	0.50~1.42	0.306
	Operator	25	0.55	0.08	0.02	0.54	1.14	0.50~0.79	
Total		80	0.56	0.13	0.02	0.55	1.20	0.50~1.42	-

※ AM : arithmetic mean, SD : standard deviation, SE : standard error, GM : geometric mean, GSD : geometric standard deviation
* $p < 0.05$

2. 지역노출량

근무 환경(사업장, 생산 라인, 공정, 직무)에 따른 극저주파자기장의 지역노출량은 측정 대상 설비로부터 3 cm 거리에서 측정되었다(Table 4 참조). A사(8.10 $\mu\text{T} \pm 0.67$)와 B사(8.28 $\mu\text{T} \pm 0.80$)의 지역노출량은 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다($t(1265) = -0.172, p = 0.864$). 한편, 생산 라인에 따른 지역노출량의 차이는 통계적으로 유의한 것으로 파악되었다($t(1265) = 3.142, p = 0.002$). Fab 라인의 지역노출 수준은 8.92 $\mu\text{T} \pm 0.59$ 로 Module 라인의 4.64 $\mu\text{T} \pm 0.99$ 보다 1.9배 높은 수준인 것으로 나타났다.

공정별 지역노출량은 Figure 1.a에 나타난 것과 같이 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다($F(3, 1263) = 5.497, p = 0.001$). CF 공정은 지역노출량이 11.41 $\mu\text{T} \pm 1.13$ 로 가장 높은 그룹으로 파악되었고, TFT와 LC 공정은 8.64 $\mu\text{T} \pm 0.82$ 와 7.54 $\mu\text{T} \pm 1.16$ 으로 중간 그룹으로 나타났다. 반면, Module 공정은 지역노출량이 4.64 $\mu\text{T} \pm 0.99$ 으로 가장 낮은 그룹으로 파악되었다.

설비별 지역노출량은 Figure 1.b에 나타난 것과 같이 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다($F(15, 1251) = 17.089, p < 0.001$). 설비별 지역노출

Table 4. Area exposure level to extremely low frequency magnetic field on 3 cm away from equipment being measured

Classification	Number of measurements	ELF-MF ceiling value(μT)							p-value
		AM	SD	SE	GM	GSD	Range		
Company	A	685	8.10	17.61	0.67	2.48	4.45	0.07~198.70	0.864
	B	582	8.28	19.33	0.80	2.69	4.59	0.06~287.20	
Production line	Fab	1048	8.92	19.03	0.59	2.72	4.79	0.06~287.20	0.002*
	Module	219	4.64	14.60	0.99	1.96	3.15	0.19~198.70	
Main process	TFT	460	8.64	17.59	0.82	2.56	5.00	0.08~186.70	0.001*
	CF	244	11.41	17.58	1.13	4.08	4.68	0.06~120.90	
	LC	344	7.54	21.59	1.16	2.22	4.36	0.06~287.20	
	Module	219	4.64	14.60	0.99	1.96	3.15	0.19~198.70	
Equipment	Deposition	220	10.36	19.78	1.33	4.03	4.05	0.07~186.70	<0.001*
	Photo	309	8.45	13.47	0.77	2.63	5.18	0.06~87.89	
	Coater	11	7.72	10.95	3.30	4.01	3.01	0.94~34.41	
	Etch	106	8.63	21.16	2.05	1.89	5.33	0.08~124.80	
	Strip	11	5.69	6.39	1.93	2.82	3.77	0.42~17.30	
	Polyimide printer	138	6.79	11.99	1.02	2.65	3.91	0.11~91.49	
	Rubbing	105	5.42	11.91	1.16	1.85	4.26	0.06~96.48	
	Vacuum alignment system	19	2.62	5.03	1.15	1.22	3.24	0.10~22.77	
	One drop filling	57	3.97	6.63	0.88	1.51	3.86	0.14~30.23	
	Implanter	18	7.86	14.95	3.52	2.63	4.77	0.20~63.30	
	Cullet, clean and polarizer	215	4.50	14.67	1.00	1.92	3.07	0.19~198.70	
	Inspection	12	2.12	2.49	0.72	1.34	2.60	0.37~8.95	
	Operating system test	3	0.59	0.24	0.14	0.55	1.64	0.31~0.76	
	Roof rail	4	123.27	138.86	69.43	41.47	7.64	4.76~287.20	
	Panel board	38	26.46	23.67	3.84	13.18	4.77	0.19~72.72	
Operation room	1	0.24	-	-	0.24		0.24	-	
Total	1,267	8.18	18.41	0.52	2.57	4.51	0.06~287.20	-	

※ AM : arithmetic mean, SD : standard deviation, SE : standard error, GM : geometric mean, GSD : geometric standard deviation
* $p < 0.05$

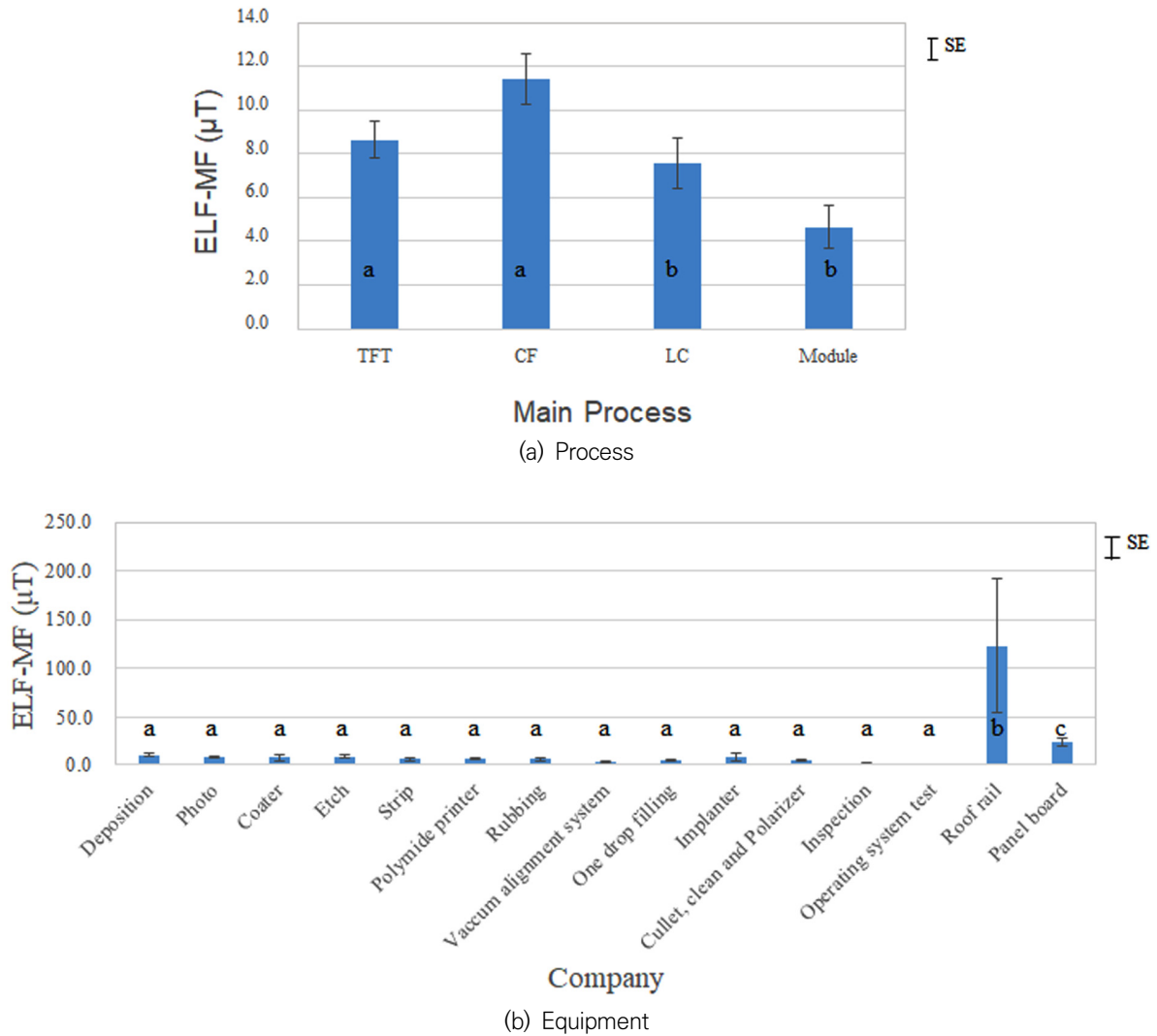


Figure 1. Extremely low frequency magnetic field by process and equipment (alphabet letters indicate statistical differences at significance level of 0.05)

수준은 Roof rail(천장 레일)이 123.27 $\mu\text{T} \pm 69.43$ 으로 가장 높은 그룹으로 나타났다. 그 다음으로, Panel board(배전반)의 지역노출량이 26.46 $\mu\text{T} \pm 3.84$ 으로 중간 그룹으로 파악되었다. 마지막으로, 나머지 설비(예: Deposition(증착), Etch(식각))는 통계적으로 가장 낮은 지역노출량(범위: 0.59 ~10.36 μT)을 보이는 그룹으로 구분되었다.

3. 거리에 따른 지역노출량 변화

본 연구는 측정 거리에 따른 지역노출량을 분석하기 위해 설비에서 3 cm 떨어진 거리에서 측정된 지역노출량이 일정 수준(약 5 μT) 이상인 설비(예: 장비, 모터,

배전반)에 대해 10 cm와 30 cm 떨어진 거리에서 추가 측정을 실시하였다. 총 38개의 설비에 대해 3 cm 거리에서 측정된 후 30 cm 거리에서 추가 측정을 실시하였으며, 이중 30 cm 거리에서 측정된 값이 3 cm 거리 측정값의 약 90 % 수준으로 감소한 일부 설비(5개)에 대해서는 10 cm 거리에서 추가 측정을 실시하였다.

극저주파자기장의 지역노출량은 Figure 2에 나타난 것과 같이 측정 거리가 멀어질수록 통계적으로 유의하게 감소하는 것으로 분석되었다. 거리 3 cm와 30 cm에서 측정된 38개의 설비에 대한 지역노출량은 Figure 2.a에 나타난 것과 같이 거리 3 cm일 때 39.06 ± 9.63 μT 였던 값이 거리 30 cm에서 3.07 ± 0.59 μT 의

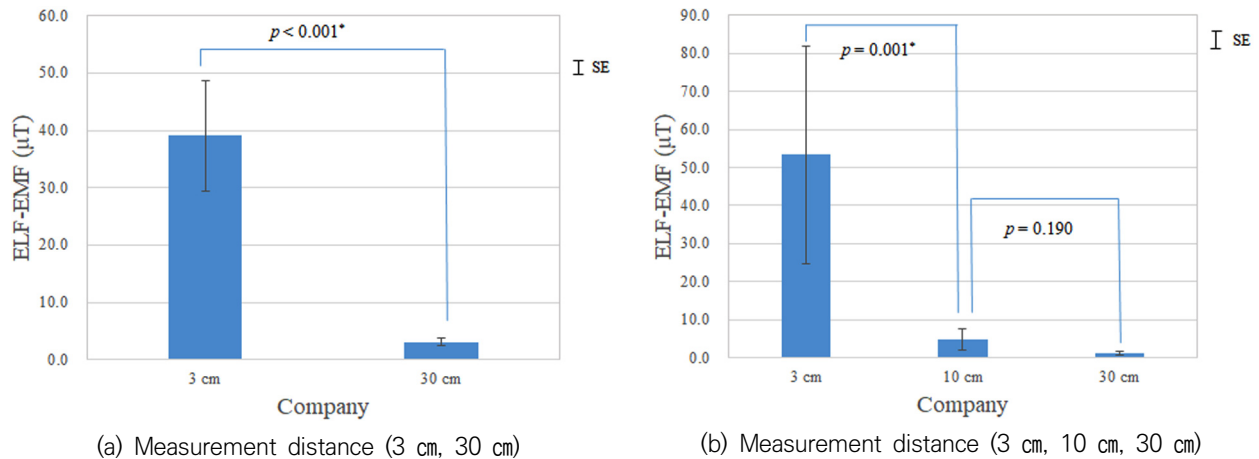


Figure 2. Extremely low frequency magnetic field by measurement distance

로 7.9 % 수준으로 현저히 감소하였다($t(37) = 31.464$, $p = 0.001$). 또한, 거리 3 cm, 10 cm, 그리고 30 cm에서 측정된 5개 설비의 지역노출량은 거리에 따라 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($F(2, 12) = 87.603$, $p < 0.001$). 거리 3 cm의 지역노출량은 $53.27 \pm 28.43 \mu\text{T}$ 로 거리 10 cm와 30 cm의 $4.92 \pm 2.79 \mu\text{T}$ 와 $1.35 \pm 0.54 \mu\text{T}$ 보다 통계적으로 유의하게 큰 것으로 분석되었다. 그러나 거리 30 cm의 지역노출량은 10 cm 보다 평균적으로 감소하는 경향이 있었으나 통계적으로 유의하지는 않았다.

IV. 고 찰

본 연구는 국내 2개 LCD사업장의 생산설비 및 고용량 전기설비에 대한 극저주파자기장 노출량을 평가 하였다. 극저주파자기장에 대한 개인노출량의 최댓값 범위는 $0.50 \sim 43.50 \mu\text{T}$ 로 나타나 작업자의 직무에 따라 순간적으로 노출되는 최대노출량에 현저한 차이가 있었다. 개인최대노출량이 가장 높았던 작업자($43.50 \mu\text{T}$)는 TFT공정 증착설비에서 작업하는 엔지니어였으며, ACGIH 노출기준(1 mT)의 4.35% 수준에 노출되는 것으로 파악되었다. 한편, LCD 사업장 근로자의 극저주파자기장 개인최대노출량은 반도체 사업장 근로자의 노출량($123.20 \mu\text{T}$)과 유사하였으나(Chung et al., 2012), 용접공의 개인최대노출량($221.28 \mu\text{T}$) 보다는 현저히 낮은 것으로 나타났다(Jeong & Hong, 2014).

근로자에게 노출되는 극저주파자기장 최대노출량은 사업장, 생산 라인, 공정에 따라 유의한 차이가 없는 것

으로 나타났으나, 직무에 따라(엔지니어: $43.50 \mu\text{T}$, 오퍼레이터: $10.50 \mu\text{T}$) 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 파악되었다. 이러한 경향성은 설비 모니터를 통해 이상상태 확인, 운전조건 조정, 제품 불량 검사업무를 수행하는 오퍼레이터 보다 설비에 이상이 있거나 고장이 발생했을 때 직접 수리하는 엔지니어가 극저주파자기장을 방사하는 설비에 근접하여 작업하기 때문인 것으로 판단된다. 한편, LCD 사업장과 유사한 작업환경을 가진 반도체 사업장의 경우도 극저주파자기장 최고노출량이 공정엔지니어($123.20 \mu\text{T}$), 장비엔지니어($109.40 \mu\text{T}$), 오퍼레이터($15.3 \mu\text{T}$) 순으로 낮아지는 것으로 보고되었다(Chung, 2012).

극저주파자기장 평균노출량($0.56 \pm 0.02 \mu\text{T}$)은 사업장, 생산 라인, 공정뿐만 아니라 직무에 있어서도 통계적으로 유의한 차이 없이 낮은 수준으로 나타났다. 이러한 결과는 근로자가 작업시간 동안 지속적으로 일정한 수준의 극저주파자기장에 노출되는 것이 아니라 간헐적으로 높은 극저주파자기장에 노출되기 때문인 것으로 해석된다. 전체 근로자 중에서 가장 높은 노출량을 보인 Fab 라인 근로자의 노출패턴을 보면(Figure 3) 대부분의 작업시간 동안 낮은 극저주파자기장에 노출되며, 간헐적으로 높은 극저주파자기장에 노출된다. 근로자들이 간헐적으로 극저주파자기장에 노출되는 이러한 양상은 근로자들이 항상 설비 근처에서 작업하는 것이 아니라 라인 밖에 있는 ROS room이나 라인 내 별도의 운영실에서 모니터 등을 통해 공정의 이상여부 등을 확인하고 조치가 필요한 경우에만 설비에서 작업을 수행하기 때문인 것으로 추정된다.

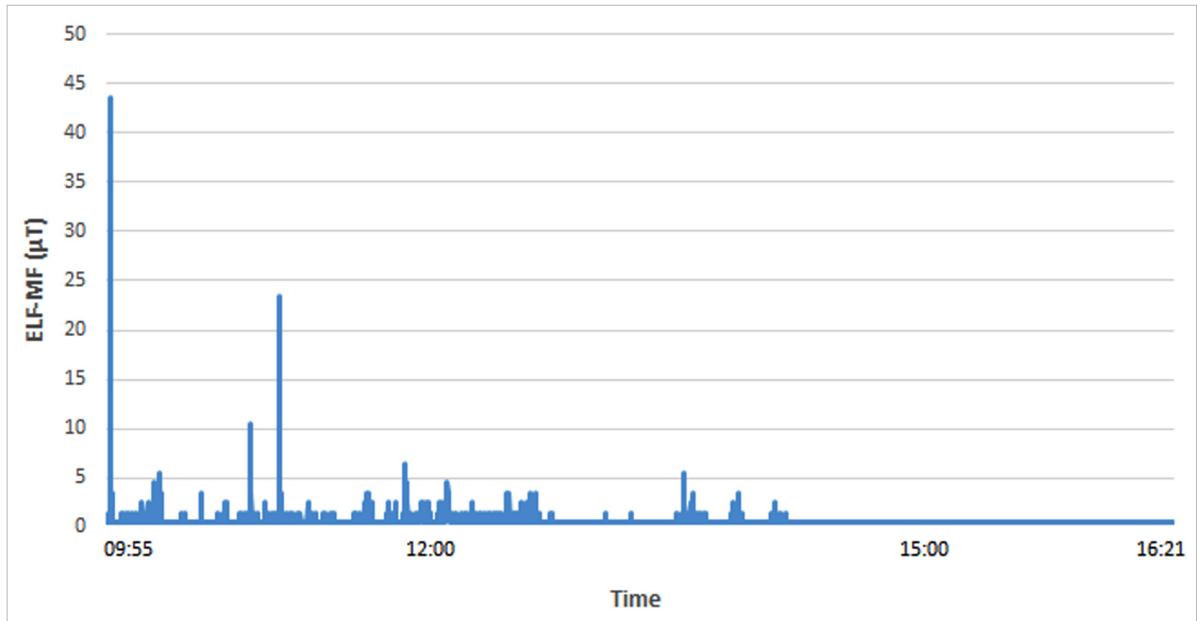


Figure 3. Worker's exposure pattern to extremely low frequency magnetic field during a working day

LCD 사업장의 설비에서 발생하는 극저주파자기장의 지역노출량 최댓값 범위는 0.60 ~ 287.20 μT 으로 나타났으며, 평균의 범위는 $8.18 \pm 0.52 \mu\text{T}$ 로 측정되었다. 높은 극저주파자기장을 발생하는 설비는 천장 레일(287.20 μT)과 배전반(72.72 μT)이었으며, 이는 ACGIH 노출기준(1 mT)의 28.7 %와 7.3 % 수준인 것으로 분석되었다. 천장 레일의 높은 지역노출량은 밀폐 또는 차폐되는 생산설비와 달리 차폐되지 않은 상태였다. 그러나 자기장은 물질을 잘 통과하는 특성으로 인해 차폐효과가 크지 않다(Kim et al., 2016. Choi, 2011). 따라서 설비에서 발생하는 극저주파자기장 수준이 낮은 것은 차폐 자체의 효과보다는 차폐로 인해 발생원으로부터 근로자 작업위치(측정 위치)가 멀어졌기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 배전반은 덮개가 설치되어 있지만 배전반 자체에서 극저주파자기장이 높게 발생하고 차폐물이 설치된 설비보다 측정위치가 발생원에 가깝기 때문에 상대적으로 높은 지역노출량을 보인 것으로 추정된다.

극저주파자기장의 지역발생수준은 사업장 간에 통계적으로 유의한 차이가 없었으나, 생산 라인에 있어서는 Fab 라인(8.92 μT)이 Module 라인(4.64 μT)보다 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Fab 라인의 설비가 Module 라인 설비보다 복잡·다양하고 자동화·대형화되어 있으며 생산설비가 많아(Fab 라인의 설비:

4,587개; Module 라인의 생산설비: 431개) 설비간의 여유 공간이 협소하기 때문으로 추정된다.

본 연구의 지역노출량 최댓값(287.20 μT)은 반도체 공정의 최대 지역노출량(860.0 μT)보다 낮은 것으로 나타났다. Chung et al.(2012)는 국내 반도체 제조사업장의 극저주파자기장 지역노출량을 측정하여 보고하였으며, 측정거리가 3 cm일 때 최댓값을 860.0 μT 으로 보고하였다. 반도체 사업장에서 비교적 높은 수준의 극저주파자기장을 발생시키는 설비는 확산공정과 이온주입공정의 설비, 분전반 전기판넬, 그리고 전선이었다. 한편, 본 연구의 LCD 사업장은 천장레일과 배전반 등과 같은 부대설비에서 가장 높은 지역노출량을 보였다.

본 연구의 극저주파자기장 지역노출량은 측정거리 3 cm, 10 cm, 30 cm에서 53.27 μT , 4.92 μT , 1.35 μT 로 측정되어 발생원에서 거리가 멀어질수록 극저주파자기장이 감소하는 것으로 나타났다. 극저주파자기장은 거리의 제곱에 반비례하여 감소하는 것으로 알려져 있으나(Cho et al., 2004), 본 연구는 여러 장비가 설치되어 있는 산업현장에서 측정하였기 때문에 주변 장비에서 발생하는 극저주파자기장의 영향 등으로 인해 역제곱 법칙에 정확히 부합하여 측정 거리의 제곱에 반비례하여 극저주파자기장이 감소하지는 않았다.

본 연구의 분석 결과를 일반화하기 위해서는 세 가지 후속 연구가 필요하다. 첫째, 본 연구는 LCD 사업장 두

곳을 중심으로 극저주파자기장의 개인 노출량과 지역 노출량을 측정 및 분석하였다. 그러나 본 연구에서 파악한 결과를 일반화하려면 보다 많은 LCD 사업장에 대한 극저주파자기장 측정 및 분석이 필요하다. 둘째, 본 연구는 LCD 사업장의 대표적인 설비에 대해 지역 노출량을 측정하였다. LCD 사업장은 그 규모가 방대하고 라인별 설비의 종류 및 수량도 많아 본 연구는 대표적인 설비에 대해서만 지역 노출량을 측정하였다. 따라서 LCD 사업장의 설비에 대한 지역 노출량을 종합적으로 평가하기 위해서는 보다 많은 설비에 대한 후속연구가 필요하다. 마지막으로, 본 연구는 근로자의 직무 내용이 사업장에 따라 다르고 한 명의 근로자가 여러 직무를 함께 수행하는 경우가 있어 직무를 엔지니어와 오퍼레이터로 단순 분류하였다. 그러나 근로자의 건강 보호에 대한 관리적 대책(예: 직무 순환)을 입안하기 위해서는 보다 세분화된 직무에 대해 개인 노출량을 측정 및 분석하는 것이 필요하다.

V. 결 론

본 연구는 LCD 사업장의 생산설비 및 고용량 전기설비에서 발생하는 극저주파자기장을 측정 및 분석하였다. 작업시간 동안의 개인노출량 평균은 $0.56 \pm 0.02 \mu\text{T}$ 로 나타났으며, 작업시간 동안의 개인노출량 최댓값에 대한 평균과 최댓값은 $6.31 \pm 0.75 \mu\text{T}$ 과 $43.50 \mu\text{T}$ 로 측정되었다. 직무에 따라서 극저주파자기장 개인노출량이 상이한 것으로 나타났으며, 엔지니어가 오퍼레이터보다 높은 수준의 노출량을 보였다. 엔지니어 중에서 가장 높은 극저주파자기장에 노출된 근로자는 TFT공정 증착설비에서 작업하는 것으로 파악되었다. 이러한 경향성은 엔지니어가 수리 등을 위해 설비 인근에 상대적으로 오래 작업하기 때문인 것으로 추정된다. 한편, 생산설비 및 고용량 전기설비에서 발생하는 극저주파자기장의 지역노출량의 평균은 $8.18 \pm 0.52 \mu\text{T}$ 로 나타났으며, 최댓값은 $287.20 \mu\text{T}$ 로 측정되었다. 상대적으로 높은 수준의 지역노출량을 나타낸 설비는 천장 레일과 배전반 등의 부대설비였다. 이러한 결과는 천장 레일과 배전반 등은 차폐된 생산설비와 달리 차폐가 되어 있지 않아 측정위치가 발생원에 상대적으로 가까웠기 때문으로 추정된다. 마지막으로, 극저주파자기장의 발생원으로부터 측정거리가 멀어짐에 따라 지역노출량이 현저히 감소하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 이러

한 결과는 근로자의 극저주파자기장 노출수준 감소를 위해 근로자들의 작업 장소를 극저주파자기장 발생원에서 최대한 이격 관리하는 것이 필요함을 시사하고 있다.

감사의 글

본 연구는 산업안전보건연구원의 자체연구과제로 수행한 결과입니다.

References

- 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
- Cho YS, Kim YS, Lee JT, Hong SC, Jang SK. Relationship between urinary metatonin levels and extremely low frequency magnetic fields for the selected primary schoolchildren living nearby and away from overhead transmission power line. *Kor J Env Hlth* 2004;30(3):191-206
- Choi HY. Design of magnetic field compensation system model for AC magnetic field shielding. *Journal of KIEE* 2011;25(7):78-82
- Chung EK, Kim KB, Chung KJ, Lee IS, Yoo KH, Park JS. Occupational exposure of semiconductor workers to ELF magnetic field. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2012;22(1):42-51
- 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>)
- 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.sho.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
- 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
- Jeong YJ, Hong SC. Exposure assessment of welders to extremely low frequency magnetic fields. J of the Korean Society Occupational and Environmental Hygiene 2014;24(4):509-517 (<http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2014.24.4.509>)
- Kim KW, Jeong EK, Kim KB, Park SH, Park HD, Seo HK, Kang JH, Kim SH, Ro JW, Hwang ES, Lee KY. Characteristics of worker's exposure to hazardous agents in LCD panel manufacturing process. Occupational Safety and Health Research Institute Research Report. 2016; p. 1-92
- Lim JW. Conformance of occupational diseases and cases of court rulings in the semiconductor industries. Proceeding of the 51th Safety & Health Week Seminar 2018; p. 2-8
- 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)
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Exposure limits for chemical substances and physical Agents (MoEL Public Notice No. 2020-48). 2020; p. 1
- Ministry of Science and ICT(MIST). Guideline for human protection to electro magnetic field(MIST Public Notice No. 2017-7). 2017. p. 2-3
- 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 Radio Research Agency. Research on issue for human safety to electro magnetic field. 2016; p. 4-19
- 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

<저자정보>

김준범(연구위원), 강준혁(연구위원), 정은교(이사), 정기효(교수)