

직업성 극저주파 자기장 노출평가와 노출 기준에 대한 쟁점 고찰

박동욱* · 이승희 · 조경이¹

한국방송통신대학교 보건환경학과, ¹서울대학교 보건대학원 환경보건학과

Brief Review on Exposure Characteristics, Monitoring Instruments and Threshold Limit Values for Extremely Low Frequency-Magnetic Field (ELF-MF)

Dong-Uk Park* · Seunghee Lee · Kyung Ehi Zoh¹

Department of Environmental Health, Korea National Open University

¹Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health, Seoul National University

ABSTRACT

Objectives: Objective of this study is to review briefly exposure characteristics, monitoring instruments and threshold limit values for extremely low frequency-magnetic field (ELF-MF) methods. This study was undertaken through brief literature review. We performed a literature search in PubMed to identify ELF-MF studies conducted in workplaces. Initial search keywords such as 'extremely low frequency-magnetic field (ELF-MF)' and 'electromagnetic fields (EMF)' combined or singly. We limited our review to occupational rather than general nonworkplace environmental exposures.

Methods: The contents we reviewed: key industry and occupations generating ELF-MF, several direct-reading instruments monitoring ELF-MF and threshold limit values (TLV) preventing health effects may be caused by the exposure to ELF-MF.

Results: The industries related to the generation and supply of electricity, electrolytic installations, welding, and induction heating and more were regarded as high ELF-MF exposure industries. All jobs handling or employed performed in power cable lines, electrical wiring, and electrical equipment are found to be exposed to ELF-MF. Threshold or ceiling limit, 1,000 μ T, is established to prevent acute effects of exposure to low-frequency EMFs on the nervous system: the direct stimulation of nerve and muscle tissues and the induction of retinal phosphenes. The International Agency for Research on Cancer (IARC) has classified ELF-MF as possibly carcinogenic to humans chiefly based on epidemiological studies on childhood leukemia. However, a causal relationship between magnetic fields and several types of cancer including childhood leukemia has not been established nor has any other long-term effects. Risk management using precautionary measures, has been initiated by the US and EU to prevent chronic health effects related to ELF-MF exposure in workplaces.

Conclusion: This study recommends the implementation of various measures such as the establishment of occupational exposure limit values for ELF-MF and precautionary principle to prevent potential chronic occupational health effects may be caused by ELF-MF in Korea.

Key words: extremely low frequency-magnetic field(ELF-MF), electromagnetic fields(EMF), ceiling value

*Corresponding author: Dong-Uk Park, Tel: +82-2-3668-4707, E-mail: pdw545@gmail.com
Department of Environmental Health, Korea National Open University, 86 Daehak-ro, Jongnogu, Seoul, 03087
Received: November 3, 2022, Revised: November 29, 2022, Accepted: December 22, 2022

 Dong-Uk Park <http://orcid.org/0000-0003-3847-7392>

 Seunghee Lee <http://orcid.org/0000-0003-4693-811X>

 Kyung Ehi Zoh <https://orcid.org/0000-0002-2821-070X>

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

전자기파(electromagnetic waves)는 전기장(electric field)과 자기장(magnetic field)이 주기적으로 변화하면서 진공 혹은 물질 속을 전파해 나가는 파동으로, 전자파로도 불린다. 전기를 생산, 운반, 사용하는 모든 곳에는 전자파가 발생한다. 전자파는 주파수가 높을수록 파장이 짧아지고 에너지는 증가하며, 주파수가 낮을수록 파장은 길어지고 에너지는 감소한다. 전자파별 주파수 대역의 범위는 문헌마다 약간씩 차이가 있다(Table 1). 전자파를 주파수 크기순으로 나열하면 마이크로파와 라디오파(100 kHz-300 GHz), 중간(intermediate) 저주파(300 Hz-100 kHz), 극저주파(300 or 400 Hz 이하)이다(Schüz & Ahlbom, 2008). 상용주파수(유럽 50 Hz, 우리나라 등 60 Hz)는 극저주파(extremely low frequency, ELF)에 속하므로, 이 주파수를 사용하는 송전탑, 전선, 각종 전기기구와 장비에서는 비교적 적은 에너지가 발생한다. 300 Hz-100 kHz 대역의 저주파 또는 중간 저주파에서는 일부 전기기구 사용 특성상 극저주파가 부수적으로 발생한다(Bowman & Methner, 2000).

현대사회에서 시민들은 가정, 다중이용시설, 직장 등에서 매일 전기와 전자 장비에서 방출되는 300 GHz 이하의 전자파, 즉 극저주파에 노출되고 있는데, 이를 전자파 스모그(electro smog)라고 한다(SAEFL, 2005). 전자파의 전기장은 피부, 나무, 건물 등 물체에 의해 쉽게 차단되고 약해지지만, 자기장은 피부 등 대부분의 물체를 통과하기 때문에 차단하기 어렵다. 극저주파 자기장(이하 극저주파라 함) 노출과 연관된 암 증가 위험을 보고한 역학연구들이 많기 때문에, 많은 연구에서 극저주파의 잠재적 건강 영향에 관심을 두고 있다(NIOSH, 2002).

본 연구에는 3가지 목적이 있다. 첫째, 극저주파 주요 발생 산업과 공정을 정리하고, 일부 업종에서 보고된 극저주파 노출수준을 고찰한다. 둘째, 문헌에서 사용된 극저주파 측정기기의 특성을 비교한다. 마지막으로 국내외 노출 기준 설정 현황과 연관된 건강위험을 고찰한다. 본 연구의 결과는 산업장에서 극저주파 건강위험을 예방하는 정책과 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

II. 방 법

본 연구는 개괄적 문헌 고찰(brief literature review)을 통해서 이루어졌다. 고찰한 주요 내용은 극저주파가 발생하는 주요 산업과 공정, 극저주파 측정기기의 특성, 국내외 극저주파 노출 기준 활용 현황 등이다. 국외 문헌 검색은 PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>)를 이용하였다. 주요 검색 용어는 ‘electromagnetic field’, ‘extremely low frequency magnetic field’ 등으로 개별 혹은 조합하였다. 국내 문헌 검색은 학술연구정보서비스(Research Information Sharing Service, 이하 RISS), 과학기술 지식인프라 국내 학술지 데이터베이스(Database Periodical Information Academic, 이하 DBpia), 한국학술정보(Korean studies Information Service System, 이하 KISS)를 이용하였다. 주요 검색 용어는 ‘전자파’, ‘극저주파’ 등이었다. 검색된 문헌의 초록에서 전자파 발생 및 직업적 노출과 관련된 주요 내용을 선별하였다. 그리고 전자파 중 극저주파를 중심으로 측정기기, 노출 기준, 급성 건강 영향 등을 정리하였다. 논란이 되고 있는 비열적 건강 영향(nonthermal health effect), 만성 질병 종류 등의 구체적 건강위험과 질병은 고찰하지 않았다. 극저주파 노출로 인한 급성 건강위험을 대상으로 하여, 과학적 사실로 인정된 내용을 중심으로

Table 1. Classification of electromagnetic fields by frequency

Type of EMF	Direct biophysical effects	Frequency*
Extremely low frequency	Non-thermal effects	1-300 Hz
Low frequency	Both thermal and non-thermal types of effects are possible	300 Hz-100 kHz
Sub-radiofrequency by ACGIH		1-30 kHz
Radiofrequency and microwave	Thermal effects	100 kHz-300 GHz
Radiofrequency by ACGIH	Thermal effects	30 kHz-300 MHz
Microwave by ACGIH	Thermal effects	300 MHz-300 GHz

* Varies slightly within the literature except for ELF-MF

Abbreviation: The American Conference of Governmental Hygienists (ACGIH)

정리하였다. 본 연구에서 극저주파 전기장에 대한 측정·노출 기준 등 평가 방법, 정자기장, 일반 시민의 전자파 노출 특성·노출 기준·노출평가 방법 등은 제외하였다.

III. 연구 결과

1. 극저주파 노출 산업과 직무

극저주파 등 전자파가 발생하는 주요 산업 또는 작업 환경은 Mild & Sandström(2015)이 보고한 표에서 인용하였다(Table 2). 극저주파 노출이 상대적으로 가장 높은 산업은 전기분해(electrolysis) 및 직류와 직류전압 변조(ripple)를 위한 전기 시설 설치, 고전압 송전탑 설치(50 Hz), 전기 아크용접(50 또는 60 Hz 등 교류,

직류, 직류전압 변조), 인덕션(induction) 히터(300 Hz-10 kHz), 저항 또는 스폿용접(DC, 50 Hz-20 kHz) 등이다. 고전압 이송 시설이나 변전소 등에서는 강한 극저주파가 발생하는데, 스위치를 꺼 놓기 때문에 노출이 높지 않다. 그러나 활선작업 때는 매우 강한 극저주파 노출이 일어난다. 전기용접에서 발생하는 전자파는 라디오파, 저주파, 극저주파 등 다양하다. 일례로 주파수가 다양한 극저주파는 용접 전기케이블 근처에서 강하게 발생한다. 용접작업자가 전기케이블을 목 주변에 걸치고 작업하면 강한 극저주파에 불필요하게 노출된다.

주파수가 극저주파와 라디오파 사이인 저주파 혹은 중간 저주파를 일으키는 산업, 시설 등은 인덕션 히터, 용접 장비 등으로 주로 극저주파가 발생하지만, 그와

Table 2. Different EMF sources and corresponding frequency range of the emission

EMF source	Static	ELF	IF	RF/ MW
Type of industry or source				
Induction heating		**		
Dielectric heating (RF: glue drying and plastic welding)				**
Industrial microwave ovens				**
Electrochemical or other installations using microwaves (e.g., chemical activation of processes)				**
Electrolytic installations		**		
Type of welding				
Arc welding (MIG, MAG, TIG, etc.)	**	**		
Spot welding		**		
Medical applications				
NMR/MRI medical diagnostic equipment	**	**		**
Surgical and physiotherapeutic use of diathermy			**	**
Communication				
Radar and other systems				**
Broadcasting systems and devices (radio & TV: AM, VHF/UHF)		**	**	**
Mobile phone base station				**
Wireless local area networks (WLANs)				**
Cordless phones				**
Bluetooth devices and hands-free kits				**
Others				
Military and research radiofrequency systems				**
RFID/EAS and other anti-theft equipment		**		**
Electricity supply networks and electricity distribution and transmission equipment		**		
Electric handheld tools		**		
Electric vehicles (trains, trams, metros)		**		

** : The main emission frequency

Abbreviation: Intermediate frequency (IF); Radiofrequency and microwave (RF/MW)

동시에 다른 대역의 전자파도 발생한다. 예를 들어 용접의 경우, 그 방식에 따라 자외선, 가시광선, 적외선, 라디오파 등이 발생한다(NIOSH, 2002). 국내 일부 산업(전자, 전기 등)이나 공정에서 극저주파에 노출된 노동자들의 노출 강도를 정리하였다(Table 3). 송전탑 활선작업 노동자의 노출(산술평균 $1.30 \pm 15.54 \mu\text{T}$, 범위 $0.5 \sim 1,671.5 \mu\text{T}$)이 가장 높았다(Lee et al., 2017). 직업인 노출 기준의 상한치(ceiling)인 $1,000 \mu\text{T}$ 를 초과한 사례는 2명으로 보고되었다. 각종 전기, 방송(broadcasting), 통신(communication) 시설과 장비 등을 설치, 유지, 정비하고 운전 등을 담당하거나 감독하는 직무와 직종에 종사하는 노동자들도 비교적 극저주파 등에 많이 노출되는 것으로 알려져 있다. 여기서 보듯이 극저주파 주요 노출 직업에 해당하는 표준직업 분류는 '전기 직종(electrical job)'이다. 또한 용접(welder), 절단(cutter) 등도 극저주파 등 전자파 노출 직종이다. 이는 현재까지 측정된 데이터이며, 그 외 여러 직무에서 측정된 극저주파 등 전자파 노출 자료는

많지 않다.

미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, 이하 NIOSH) 홈페이지에 나온 직종별 극저주파 노출 중위수와 범위를 참고 자료로 정리하였다(Table 4). 이 자료는 미국, 스웨덴, 뉴질랜드, 핀란드, 이탈리아에서 수행한 10개 연구를 종합하여 노동자 또는 노동자 근처에서 측정된 2,317개의 측정값을 수집한 인구 기반 직업 노출 매트릭스(Job Exposure Matrix, 이하 JEM)(Bowman et al., 2007)별 극저주파 노출 강도이다. 표준직업(Primary Standard Occupational Classification, four-digit)별 극저주파 강도(산술평균, 표준편차, 기하평균, 기하 표준편차)는 NIOSH 홈페이지에 엑셀로 제시되어 있다(NIOSH, 2013). 평균 극저주파 강도가 높은 직종은 뉴질랜드에서 보고된 용접작업자($8.1 \mu\text{T}$), 송전탑 배선 라인 작업자(electric line worker, $3.6 \mu\text{T}$)였다. 단, 극저주파 대역의 강도, 발생원으로부터의 거리, 근무 시간, 직무 특성 등에 따라 극저주파 노출

Table 3. Summary of ELF magnetic field exposures among various types of manufacturing industries reported in South Korea

Type of industry/operation	No. of companies/workers investigated	No. of measurements	AM (SD), μT	GM (GSD)*, μT	Range, μT	Instrument	Ref
Steel (electric furnace up to 60 ton)	2	NI [†]	15.4/19.7	NI	26.1/43 (Max)	EFA-300 [‡]	(Kim et al., 2002)
Broadcasting/transmitting	2	NI	0.1/0.22	NI	0.1/0.3		
Transformation of voltage	1	NI	0.8	NI	0.7		
High voltage cable (operation)	1	NI	2.5	NI	2.5		
High voltage cable (C/R)	1	NI	0.1	NI	0.04		
High voltage cable (breaker)	1	NI	10.4	NI	10.3		
High-frequency heating	2	NI	1.5	NI	0.6		
Electric welding	1	NI	5.4	NI	1.1		
LCD (liquid crystal display)	2 (80)	1,316	6.31 (6.75)	4.31 (2.41)	0.50-43.50	Emdex lite	(Kim et al., 2022)
Semiconductor	4 (81)	533,275	0.10=1.14 (0.15-2.01) [§]	0.07-0.82 (1.99-4.12) [§]	0.55-123.2	EMDEX Lite	(Chung et al., 2012)
Welding	2 (3)		3.46 (13.4)	0.45 (4.70)	background-129.6	EMDEX Lite	(Chung et al., 2012)
Welding	NI (19)	NI	4.70 (9.31)	NI	221.28 (Maximum)	EMDEX II and EMDEX Lite	(Jeong and Hong, 2014)
Supply of high-voltage line	10 (37)	144,318	1.30 (15.54)	0.63 (2.00)	0.5~-1,671.5	EMDEX Lite	(Lee et al., 2017)
Semiconductor	1 (117)	108,007	0.8 (2.88)	0.24 (3.73)	0.01~-	EMDEX II	(Choi et al., 2018)

* unit-less; [†]NI:Not identified; [‡]monitored at area; [§]Range of average

Table 4. Average magnetic field exposures for various types of workers (unit: μT) (NIOSH, 2022)*

Type of worker	Average daily median [†]	Exposure range
Clerical workers without computers	0.1	0.02-0.2
Clerical workers with computers	0.1	0.05-0.5
Machinists	0.2	0.1-3.7
Electric line workers	0.3	0.1-3.5
Electricians	0.5	0.1-3.4
Welders	0.8	0.2-9.6
Workers off the job (home, travel, etc.)	0.1	0.03-0.4

* Cited from NIOSH homepage: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/96-129/default.html>

[†]The median is the middle measurement: Half the workers have average daily exposures above this point and half below

강도는 다르기 때문에 단순 비교할 수는 없다. 또한 일반 및 작업장에는 극저주파 발생원이 너무 많기 때문에 이들에 대한 노출을 모두 평가하는 것은 불가능하다. 대신 극저주파 노출 위험이 큰 환경을 관리하는 것이 효율적이다.

2. 극저주파 자기장 측정기기

극저주파 측정기기의 특성을 요약하였다(Table 5). 국내 문헌에서 극저주파를 측정한 기기는 주로 EMDEX II와 EMDEX Lite였다(Table 3). 모두 실시간으로 자기장을 모니터링하고 검출값을 저장하는 직독식 기구(direct reading instrument)이면서 개인 노출 측정기이다. 서론에서 기술한 바와 같이 자기장의 인체 투과와

암 등 질병 위험과의 관계 때문에 대부분의 연구에서는 극저주파 자기장만을 측정한다. 모니터링 자료를 로깅(logging)하는 시간 간격(초나 분), 모니터링한 자료들을 저장하고 종합하는 방식(TWA나 RMS (root-mean square)), 전기장과 자기장 측정 가능성 등에 따라 기기를 선택할 수 있다. 극저주파 자기장 강도는 A/m(미터당 암페어)로 측정되지만, 일반적으로 자속밀도 단위인 μT (마이크로테슬라) 또는 mG(밀리가우스, $1 \mu\text{T}=10 \text{ mG}$)로 나타낸다.

기기별 장점과 단점 등 구체적인 특성은 Bowman (1998)이 정리한 문헌에 설명되어 있다(Bowman, 1998; Portier & Wolfe, 1998). 극저주파 발생 특성과 조사 범위, 목적 등에 따라 기기를 선택할 수 있다.

Table 5. Characteristics of direct reading instruments to monitor extremely low frequency magnetic fields

Type of instrument	Sensor	Frequency range	Sampling rate, seconds	Sampling strategy	Dynamic range, μT	Monitoring of electric field
IREQ / Positron electromagnetic dosimeter	Three orthogonal air-core induction coils	40-200 Hz	60	Personal	3.1 nT-50 μT	yes
AMEX-3D	Three orthogonal air-core induction coils	25-1200 Hz	Continuous monitoring	Personal	0.05-9.7	no
EMDEX II	Three-axis induction coils	40-800 Hz	1.5	Personal	0.01-400	no
EMDEX Lite		40-1000 Hz	2	Personal	0.5 μT -7 mT	no
ELT-400				Area		
Power-frequency Field Meter	Single-axis induction coil	40-1000 Hz	No information	Area, spot, instantaneous	0.01-1250	yes
Multiwave System	Three-axis induction coils	10 Hz-10 kHz	10	Area	0.001-200	yes
LINDA System: EMDEX II on a surveyor's wheel	Three-axis induction coils	40-800 Hz	1.5	Area, an extended walk down the plant's aisles	0.01-400	no

대부분 측정할 수 있는 주파수 범위인 40-800 Hz에서 감지되는 극저주파 자기장을 x, y, z 세 축에서 측정해 RMS로 평균한다. 최대 측정치는 EMDEX II가 12,000 μ T이고 EMDEX Lite가 7,000 μ T이다(High field type). 표준형은 최대 100-300 μ T까지 측정하므로 노출 기준 초과 여부를 판단하는 데 적절치 않다. 측정 간격은 EMDEX II는 최소 1.5초이고, EMDEX Lite는 0.5초이다. 특정 주파수별 자기장 측정은 주파수 분석 기능이 있는 WP 등 다른 장비를 이용해야 한다(Bowman, 1998; Renew et al., 2003).

3. 극저주파 자기장의 건강 영향 및 노출 기준

1) 건강 영향

전자파의 에너지는 유전적 세포 분자의 화학결합을 이온화(break)할 정도로 충분하지는 않지만, 전자파에 노출되면 직접적으로 열적(thermal or heating), 비열적, 생물물리학적(biophysical) 건강 영향을 일으킨다(Schüz and Ahlbom 2008). 낮은 주파수의 전자파에 의한 주요 건강 영향은 비열적 건강 영향이며, 라디오파 같은 높은 주파수의 전자파에 의한 건강 영향은 열적, 비열적 건강 영향이다(Schüz & Ahlbom, 2008).

생물물리학적 건강 영향은 극저주파 등 전자파 존재 자체(presence) 또는 노출에 의하여 인체에 직접적으로 나타나는 급성 영향(acute effect)으로 정의하였다(EU, 2013). 열적 건강 영향은 생체 조직이 전자파로부터 에너지를 흡수함으로써 가열되는 것이다. 눈과 같이 혈액의 흐름이 낮은 기관은 흡수한 열을 빠르게 식히지 못하기 때문에, 백내장 등의 병이 생길 위험이 있다. 집중적인 전자파 노출은 인체를 가열하고, 이로 인해 감기와 유사한 증상이 발생하기도 한다(SAEFL, 2005). 비열적 건강 영향은 유도전류로 인해 근육, 신경(nerves) 또는 감각기관(sensory organ)에 자극(stimulation)이 일어나는 것이다. 비열적 건강 영향은 노출된 노동자의

정신적, 물리적 건강에 악영향을 줄 수 있다. 감각기관이 자극을 받으면 일시적인 현기증 또는 눈 망막의 섬광(magnetophosphenes)이 일어날 수 있다. 또한 불쾌감, 인지감(cognition) 등 뇌에 악영향을 일으킬 수도 있다(EU, 2013). 극저주파 등에서 발생한 유도전류 노출에 따른 급성 건강 영향은 중추 및 말초신경계 기능에 영향을 주어 현기증, 메스꺼움, 금속 맛 느낌(metallic taste feelings) 등도 일으킨다(Mild & Sandström, 2015). 또한 극저주파 등 전자파는 인공 심박동기(cardiac pacemaker), 임플란트 등 의료 전기 장비의 작동 방해, 감전(contact current), 화재와 폭발 등의 간접적 건강 영향도 일으킨다(ICNRP, 2010; ICNRP, 2014). 이는 의료 장비 오작동 예방 관점에서 관심을 더 가질 만하다.

2) 급성노출 기준

① 미국

미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 이하 ACGIH)의 극저주파에 대한 최고노출기준(Ceiling value), 즉 어떤 경우라도 넘어서는 안 되는 수치로 제안하였다(ACGIH, 2022)(Table 6). 1-300 Hz의 주파수 범위별로 노출되는 신체 부위별 극저주파의 최고노출기준을 추정하는 공식을 제시하였다. 주파수가 높을수록 상한치는 낮아진다. 예를 들면 인체 전신 극저주파 최대노출기준은 주파수에 따라 아래 식으로 정할 수 있다.

$$B_{TLV}(mT) = 60/f, f : Hz \quad (1)$$

예를 들어 상용주파수인 60 Hz에 노출될 경우 최고노출기준은 1 mT=1,000 μ T이다.

만성적인 건강 영향을 예방하기 위한 기준은 없다. 미

Table 6. ACGIH-TLV for sub-radiofrequency (30 kHz and below) magnetic fields

Frequency range	Body part exposed	TLV, ceiling	TLV in 60 Hz, millitesla (mT)
1 to 300 Hz	Whole-body exposure	60/f	1000.0
1 to 300 Hz	Arms and legs	300/f	5000.0
1 to 300 Hz	Hands and feet	600/f	10000.0
300 Hz to 30 kHz	Whole-body and partial-body		0.2

f=frequency in kHz

국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, 이하 OSHA)에는 아직 노동자 보호를 위한 연방 차원의 전자파 노출 기준이 없다. 그러나 사업주의 포괄적 의무(general duty clause citation)로 두고 있다(OSHA, 2022). 또한, 각 주(State)에서는 노출 기준 제정이나 사전주의 원칙에 따라 전자파 노출을 줄이는 정책을 펴고 있다. 참고로 일반 시민의 건강 보호를 위해 6개 주(Florida, Minnesota, Montana, New York, Oregon, New Jersey)는 극저주파 전기장과 자기장 노출 기준을 제정하였다(EMFs.info, 2022).

② EU 등 유럽

EU의 극저주파 노출 기준은 1 Hz부터 10 MHz까지 주파수 범위별로 구분하여 제시하였다(Table 7). 여기서는 노출 기준 대신 관리 기준(action level)이라는 용어를 사용하였다. 관리 기준은 상한(higher)과 하한(lower), 그리고 팔다리 국소 부위 노출 기준으로 구분하였다. 상용주파수인 50 Hz나 60 Hz에서 극저주파 하한 관리 기준은 1,000 μ T로 ACGIH 노출 기준의 상한치와 같고, 상한 관리 기준은 5,000 μ T 또는 6,000 μ T이다. 이러한 관리 기준 제정은 극저주파 노출로 인한 열적, 비열적 건강 영향 등을 막기 위한 것이다. ACGIH와 마찬가지로 만성노출에 따른 건강 영향을 예방하기 위한 기준은 없다. 이는 인과관계가 과학적으로 규명되지 않았기 때문이라고 설명하였다(ICNIRP, 1998; NIOSH, 2002). 2016년에 시행된 영국의 극저주파 급성노출 기준은 EU와 같이 관리 기준이다. 중추신경계와 감각기관의 건강 영향을 예방하기 위한 하한 관리 기준은 1,000 μ T이고, 말초신경계의 건강 영향을 예방하기 위해 신체 전체에 적용하는 상한 관리 기준은 6,000 μ T로 설정하였다. 팔다리 급성 관리 기준은 18,000 μ T이다(EMFs.info, 2022).

독일은 극저주파 직업 노출을 4개의 영역으로 구분하여 관리하고 있다. 대중이 이용하는 회사(공장)용 영역인 노출 지역 2(exposure area 2), 노출 지역 2의 법적 노출 기준을 초과한 영역인 노출 지역 1(exposure area 1), 노출 지역 1의 법적 노출 기준을 초과한 영역인 관리 지역(controlled area), 그리고 관리 지역의 노출 기준을 초과한 위험 지역(danger area)이다. 예를 들어 극저주파 노출 지역 1에서 1-1000 Hz에 대한 급성노출 기준은 산출 공식($67.9/f$, $f=kHz$)에 따라 상용주파수 50 Hz인 경우 1,358 μ T이다(EMF-portal, 2022). 그 외에도 스위스, 네덜란드, 이탈리아 등 많은 나라들이 극저주파 등 전자파 노출을 줄이기 위한 다양한 정책을 펴고 있다.

③ 국제비이온화방사선위원회(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP)

ICNIRP는 비정부 국제 전문가 단체로 극저주파, 라디오파 등에 대한 시민과 근로자 노출 기준을 꾸준히 개발하고 있다. ICNIRP가 개발한 극저주파 제한 기준(Basic restrictions)은 여러 국가에서 열적 급성 건강 영향을 예방하기 위한 기준으로 활용하고 있다. ICNIRP가 권고한 극저주파 직업성 급성 제한 기준은 상용주파수를 포함한 대역(25 Hz-300 Hz)에서 0.001 T(1 mT=1,000 μ T)로, ACGIH와 다른 나라 기준과 같다. 주파수 대역별 기준(T)을 추정하는 식(1 Hz-8 Hz; $0.2/f^2$, 8 Hz-25 Hz; $2.5 \times 10^{-2}/f$, 300 Hz-300 kHz; $0.3/f$, $f=Hz$)을 권고하고 있다(ICNIRP, 2010; ICNIRP, 2014). 주파수별 인체 노출 부위별 기준은 없다.

④ 우리나라

산업안전보건법에서는 극저주파 등 전자파 노출 기준을 제정하지 않았다. 극저주파가 발생하는 위험 산업과

Table 7. EU action level for exposure to magnetic field from 1 Hz to 10 MHz

Frequency range	Magnetic flux density Low ALs(B) [μ T] (RMS)	Magnetic flux density High ALs(B) [μ T] (RMS)	Magnetic flux density ALs for exposure of limbs to a localized magnetic field [μ T] (RMS)
$1 \leq f < 8$ Hz	$2.0 \times 10^5/f^2$	$3.0 \times 10^5/f$	$9.0 \times 10^5/f$
$8 \leq f < 25$ Hz	$2.5 \times 10^4/f$	$3.0 \times 10^5/f$	$9.0 \times 10^5/f$
$25 \leq f < 300$ Hz	1.0×10^3	$3.0 \times 10^5/f$	$9.0 \times 10^5/f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3.0 \times 10^5/f$	$3.0 \times 10^5/f$	$9.0 \times 10^5/f$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	1.0×10^2	1.0×10^2	3.0×10^2

f=frequency in Hz

공정 등은 관리되지 않고 있다. 산업안전보건법 고시 「화학물질 및 물리적 인자의 노출 기준」 제4조 적용 범위에서 '이 고시에 유해 인자의 노출 기준이 규정되지 아니하였다는 이유로 법, 영, 규칙 및 보건 규칙의 적용이 배제되지 아니하며 이와 같은 유해 인자의 노출 기준은 미국 ACGIH에서 매년 채택하는 노출 기준(TLVs)을 준용한다.'고 명시하고 있다(MoEL, 2022). 이 고시의 적용 범위에 따르면 극저주파 노출평가 또는 건강 영향과의 연관 등을 추정할 때는 ACGIH가 권고한 노출 기준 상한치를 적용하는 것이 필요하다.

3) 만성노출 기준

극저주파 등 전자파의 암 발생 위험은 역학연구에서 얻은 인과관계가 제한적이며(limited) 실험연구에서도 증거가 불충분하다고(inadequate) 판단된 상태이다(ICNRP, 1998). 이에 따라 극저주파에 대해 노동자나 일반 시민에 적용할 수 있는 만성노출 국제 권고 기준은 아직 없다. 문헌에서 극저주파 등 전자파의 만성노출에 따른 질병 위험은 끊임없이 보고되고 있다. 세계보건기구(WHO) 산하 국제 암 연구소(IARC)에서는 극저주파 자기장을 암 발생 등급 2B로, 극저주파 전기장은 3등급으로 분류한다(IARC, 2002). 2001년 WHO는 많은 역학연구를 종합한 결과 0.3-0.4 μT 의 극저주파 자기장에 만성적으로 노출된 소아 그룹의 백혈병 발생 위험이 0.1 μT 이하 노출 그룹보다 약 2배 높다는 결론을 내렸다(Ahlbom et al., 2000; Greenland et al., 2000). WHO는 위험의 파급효과가 매우 크고 비가역적일 가능성이 있다고 판단되는 경우에는 위험에 대한 과학적 증거가 부족해도 미리 조치(measure)를 취해야 한다는 '사전주의 원칙(precautionary principle)'을 권고한다(WHO, 2007a; WHO, 2007b). 이에 따라 미국, EU 등 여러 국가는 극저주파 등 전자파 노출을 피하거나 줄이기 위한 노출 또는 허가 기준 설정 등 다양한 정책을 펼치고 있다(SAEFL, 2005; EU, 2013; EMFs.info, 2022). 또한 EU의 여러 나라에서는 사전주의 정책으로 시민의 극저주파의 노출 기준을 다양하게 권고하고 있다(Belyaev et al., 2016; Stam, 2018). 유럽환경의학학술단체(European Academy for Environmental Medicine, EUROPAEM)는 시민의 극저주파 1일 평균 노출 기준을 최대 0.1 μT 로 권고하였다(Belyaev et al., 2016). 본 연구에서는 극저주파에 대한 법적 만성노출 기준을 찾지 못하였다.

IV. 고찰

본 연구에서는 문헌 고찰을 통해 전자파 중 극저주파가 발생하는 주요 산업과 직무 등을 종합하고, 극저주파 측정과 노출평가 방법, 그리고 국내외 노출 기준을 개괄적으로 정리하였다. 우리나라에서 극저주파 측정 및 노출평가는 다른 물리적, 화학적 유해 인자에 비해 거의 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 해외의 상황도 비슷하다. 이는 극저주파 등 전자파 만성노출에 따른 질병 위험의 인과관계가 아직 과학적으로 규명되지 않았기 때문으로 여겨진다. 문헌에서도 암 등 만성적인 건강 영향 연구에 비해 극저주파 등 전자파 측정 및 노출평가 결과는 상대적으로 적게 보고된다. 극저주파 노출 위험, 노출평가, 노출 기준과 관련된 주요 쟁점을 우리나라의 상황과 비교해서 고찰하였다.

첫째, 극저주파 등 전자파에 노출되는 주요 산업 및 공정, 직무에 종사하는 노동자들에 대한 관리가 필요하다. 우리나라 산업안전보건법에는 극저주파 등 전자파 측정에 대한 법적 의무 조항은 없지만, 산업안전보건기준에 관한 규칙 제668조에 『사업주는 사업장에서 발생하는 유해광선 등 비전리전자기파로 인해 심각한 건강장해가 발생할 우려가 있을 경우, ① 발생원의 격리·차폐·보호구 착용 등 적절한 조치, ② 비전리전자기파 발생장소에 경고문구 표시, ③ 인체 영향 및 안전작업방법 주지 등』을 실시하도록 규정하고 있다. 그러므로 전자파가 발생하는 주요 산업 또는 작업환경(Table 2)에 대한 노출 실태를 파악하고 우선순위를 정하여 노출평가를 실시할 필요가 있다. 우리나라에서 2018년과 2019년 송전탑 배전 담당 노동자가 걸린 백혈병이 극저주파 노출로 인한 직업병으로 인정되었다(NEWSIS, 2016). 2022년 서울행정법원은 25년 동안 송전탑 활선작업을 담당했던 노동자가 근로복지공단을 상대로 낸 갑상샘암 요양 불승인 처분 취소 소송에서 이 사례를 직업병으로 인정하였다(Medical Today, 2022).

극저주파에 노출되는 주요 직무는 전기 생산, 운반 및 사용 시설과 장비 운전, 정비 등이다. 특히 고압 송전탑, 변압실, 각종 전기 설비 등을 관리하는 공정에서 일하는 노동자의 극저주파 노출이 높다고 알려져 있다. 산업안전보건연구원이 보고한 배전 노동자 38명의 1일 극저주파 노출을 평가한 결과, 100 μT 를 초과한 사람이 24명(65%)이었고, 2명은 상한치(1,000 μT)를 초과

하였다(Lee et al., 2017). Renew et al.(2003) 은 영국의 전기 생산과 운반(송전) 시설 10곳을 조사한 결과, 송전탑 아래 직무(Overhead line-on the tower)에서 11.8 μT 로 극저주파 평균 노출이 가장 높았다고 보고하였다. 국내외 송전탑 배전 작업자의 극저주파 자기장 평균 노출수준(1.3 μT)은 변전소 근무자(0.43 μT), 용접작업자(0.95 μT), 반도체 공장 노동자(0.78 μT), LCD 공장 노동자(0.51 μT)보다 높다(Chung et al., 2012; Choi et al., 2018). 활선(무정전) 직무 노동자의 최대 노출수준(1,671.5 μT)(Lee et al., 2017)도 반도체 공장 노동자(123.2 μT , 109 μT), LCD 공장 노동자(43.5 μT)(Chung et al., 2012; Choi et al., 2018), 제철소 전기 용해로 근무자(43 μT), 용접작업자(129.6 μT , 221.3 μT)(Chung et al., 2012)보다 훨씬 높다(Table 3). 주요 문헌에서 보고한 JEM별 극저주파 노출 분포에서도 전기 직종 노동자의 노출이 가장 높다(Portier & Wolfe, 1998; Bowman et al., 2007). 전기 직종 외 직무의 평균 극저주파 노출수준은 대부분 0.5 μT 이하이다. Gobba et al.(2011)은 노동자 543명을 대상으로 2일 동안 개인 극저주파 노출을 모니터링한 결과, 작업장에서는 0.14 μT , 집에서는 0.03 μT , 그리고 외부에서는 0.05 μT 로 평가해 작업장에서의 노출이 약 60 %라고 보고하였다. 이처럼 극저주파 만성 노출에 따른 직업병 사례가 발생하고 문헌에서 암 등 여러 만성질환 등의 발병 위험을 주장하고 있으므로(Kheifets et al., 2010; Huss et al., 2018), 극저주파 등 전자파 노출 위험이 큰 산업, 공정과 직무 등(Table 2)에 노출된 노동자 현황과 이들에 대한 노출평가 및 질병 위험 관리가 필요하다.

둘째, 극저주파 등 전자파에 대한 노출 기준 제정과 노출을 줄이기 위한 조치가 필요하다. 현재 활용되는 극저주파 노출 기준은 급성 기준 또는 상한치이다(Table 6과 Table 7). 이는 신경 손상, 망막 손상 등 급성 열적 영향을 예방하기 위한 기준(50이나 60 Hz에서 1,000 μT)이다. 극저주파 등 전자파에 대해 인과관계가 과학적으로 증명된 만성노출 기준은 아직 없다. 극저주파 등 전자파 노출과 각종 암(Huss et al., 2018), 퇴행성신경질환(Brouwer et al., 2015), 생식독성(Udroiu et al., 2015) 등과의 인과관계는 논란 중이다. 그러나 미국, 유럽 등은 사전주의 원칙에 근거하여 극저주파 등 전자파의 잠재적 건강 영향을 관리하고 있다(EMFs.info, 2022). 우리나라에서 극저주파 등 전

자파 측정, 노출 기준 제정, 노출을 줄이기 위한 법적 조치 등에 대한 연구와 논의가 시급하다.

셋째, 극저주파 등 전자파 노출에 대한 민감한 환자, 임산부, 의료 장비 부착(implanted medical devices) 노동자 등에 대한 보호 관리가 필요하다(Modenese & Gobba, 2021). 2016년에 시행된 EU directive에 따르면, 사업주는 전자파에 특히 민감한 임산부, 환자, 인체 내에 능동적(active)·수동적(passive) 의료 장비를 부착한 노동자 그룹을 보호하기 위해 극저주파 등 전자파 위해성 확인, 위험성평가와 관리 등을 의무로 시행해야 한다고 규정하고 있다(EU, 2013). 급성노출 기준 1,000 μT 이하의 노출이라도 인체에 의료 장비를 부착하는 노동자들에게는 작동 방해 등 직접, 간접적인 영향이 발생할 수도 있기 때문이다(EMFs.info, 2022).

마지막으로, 극저주파와 저주파는 발생 또는 사용 주파수를 확인하고, 적절한 측정기기를 선택하는 것이 필요하다(Table 5). 상용주파수(50 Hz 또는 60 Hz)를 사용하는 경우에는 주파수 구분 없이 직독식 측정기기를 사용한다. 그러나 용접 등과 같이 극저주파 대역을 초과하는 주파수에 노출되는 직무에서는 발생 주파수를 분석하고 주파수별로 구분하여 자기장의 강도를 측정하고, 주파수별 보정 상한치 또는 급성노출 기준을 적용해야 한다(Choi et al., 2019). 즉, 공정 및 설비 조건에 따라 주파수를 증폭하여 사용하는 경우에는 주파수 분석을 통해 보정 노출 기준을 적용하여 평가하여야 한다. 극저주파 등 전자파 노출수준은 직무 특성과 환경 등에 따라 매우 다를 수 있다. 공정과 직무의 특성이 다르고, 일반 환경과 노동환경을 구분하는 것이 어렵기 때문에 극저주파 노출수준 추정에는 늘 불확실성이 존재한다. 역학조사에서 연구 대상자의 극저주파 등 전자파의 과거 직업적 노출을 추정하기 어려운 이유이다. 극저주파의 건강위험을 과학적으로 규명하려면 극저주파 노출 기준의 한계를 이해하고 이를 바탕으로 극저주파 노출수준을 가능한 한 정확하게 평가하는 것이 중요하다.

V. 결 론

극저주파 자기장 등 전자파의 위험으로부터 노동자를 보호하기 위해서는 구체적인 규제 조항과 노출 기준 등을 규정으로 명시할 필요가 있다. 본 연구에서는 미국,

EU 등에서 극저주파 등 전자파 노출 위험을 예방하기 위한 노출 기준을 제정하고 사전주의 정책을 실행하는 사례를 고찰하였다. 이에 근거하여 우리나라에서도 극저주파 등 전자파 노출로 인한 잠재적인 질병 위험을 예방하기 위한 사전주의 조치를 취해야 한다. 특히 극저주파 등 전자파 노출에 민감한 임산부, 환자, 의료 장비 부착 노동자 그룹 등을 보호하기 위한 사업주 의무 제정이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 한국방송통신대학교 지원을 받아 작성된 것으로 이에 감사를 드립니다.

References

- ACGIH. 2022 threshold limit values (TLVs) and biological exposure indices (BEIs). American Conference of Governmental Industrial Hygienists Cincinnati, OH, 2022
- Ahlbom A et al. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *British journal of cancer* 2000; 83(5): 692-698
- Belyaev I et al. EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses. *Reviews on environmental health* 2016; 31(3): 363-397
- Bowman J, Methner M. Hazard surveillance for industrial magnetic fields: II. Field characteristics from waveform measurements. *Annals of Occupational Hygiene* 2000; 44(8): 615-633
- Bowman J D. Manual for measuring occupational electric and magnetic field exposures, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, 1998.
- Bowman J D, Touchstone J A, Yost M G. A population-based job exposure matrix for power-frequency magnetic fields. *Journal of occupational and environmental hygiene* 2007; 4(9): 715-728
- Brouwer M et al. Occupational exposures and Parkinson's disease mortality in a prospective Dutch cohort. *Occupational and environmental medicine* 2015; 72(6): 448-455
- Choi S et al. Extremely low frequency-magnetic field (ELF-MF) exposure characteristics among semiconductor workers. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2018; 15(4): 642
- Choi S et al. Characterization of levels of extremely low frequency magnetic fields emitted from portable hand-held fans. *Bioelectromagnetics* 2019; 40(8): 569-577
- Chung E K et al. Occupational exposure of semiconductor workers to ELF magnetic fields. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene* 2012; 22(1): 42-51
- EMF-portal. Limit values in Germany (occupational exposure). [Accessed 2022 2 Nov]; Available from: <https://www.emf-portal.org/en/cms/page/home/more/limits/limit-values-in-germany-occupational-exposure>
- EMFs.info. The Control of Electromagnetic Fields at Work Regulations 2016. [Accessed 2022 28 Oct]; Available from: <https://www.emfs.info/limits/limits-organisations/regulations-2016/>
- EMFs.info. Limits in the USA. [Accessed 2022 28 Oct]; Available from: <https://www.emfs.info/limits/limits-usa/>
- European Union(EU) Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th Individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and Repealing Directive 2004/40/EC. [Accessed 2022 31 Oct]; Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32013L0035>
- Gobba F, Bravo G, Rossi P, Contessa G M, Scaringi M. Occupational and environmental exposure to extremely low frequency-magnetic fields: a personal monitoring study in a large group of workers in Italy. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 2011; 21(6): 634-645
- Greenland S, Sheppard A R, Kaune W T, Poole C, Kelsh M A. A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. *Epidemiology* 2000; 11(6): 624-634
- Hardell L, Sage C. Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards. *Biomedicine & pharmacotherapy* 2008; 62(2): 104-109
- Huss A, Spoerri A, Egger M, Kromhout H, Vermeulen R. Occupational extremely low frequency magnetic fields (ELF-MF) exposure and hematolymphopoietic cancers-Swiss National Cohort analysis and updated meta-analysis. *Environmental research* 2018;

- 164:467-474
- International Agency for Research on Cancer(IARC). Non-ionizing Radiation: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. 2002
- International Commission on Non-ionizing Radiation Protection(ICNRP). Guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz. *Health physics* 2014; 106(3): 418-425
- International Commission on Non-ionizing Radiation Protection(ICNRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health physics* 2010; 99(6): 818-836
- International Commission on Non-ionizing Radiation Protection(ICNRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health physics* 1998; 74(4): 494-522
- Jeong Y J ,Hong S C. Exposure assessment of welders to extremely low frequency magnetic fields. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene* 2014; 24(4): 509-517
- Kheifets L, Renew D, Sias G, Swanson J. Extremely low frequency electric fields and cancer: assessing the evidence. *Bioelectromagnetics: Journal of the Bioelectromagnetics Society, The Society for Physical Regulation in Biology and Medicine, The European Bioelectromagnetics Association* 2010; 31(2): 89-101
- Kim J, Kang J H, Chung E-K, Jung K. A study on the extremely low frequency magnetic fields exposure characteristics of workers in LCD manufacturing process. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene* 2022; 32(1): 10-20
- Kim Y, Paek J, Ha M. Survey of EMF exposure of laborers at the working places. Inchoen: OSHRI; 2002
- Lee S, Park J, Ahn J, Shin M. Exposure to ELF-magnetic fields of high voltage power lines workers. Ulsan: OSHRI; 2017
- MedicalToday. "High voltage" line worker's thyroid cancer is approved as occupational disaster compensation. [Accessed 2022 Oct 28]; Available from: <https://mdtoday.co.kr/news/view/1065577170439012>
- Mild K ,Sandström M. Guide electromagnetic fields in working life. A guide to risk assessment. European Trade Union Institute 2015
- Mild K H ,Sandström M. Electromagnetic fields in working life. A guide to risk assessment. 2015
- Modenese A, Gobba F. Occupational exposure to electromagnetic fields and health surveillance according to the European directive 2013/35/EU. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021; 18(4): 1730
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Occupational Safety and Health Act, Enforcement Rules of the Occupational Safety and Health Act Ordinance No. 363, 2022. 8. 18., partially amended].
- NEWSIS. Electrical worker's "leukemia - occupational disaster"... the second approved occupational disaster compensation. [Accessed 2022 Oct 28]; Available from: https://newsis.com/view/?id=NISX20190322_0000596605&cID=10201&pID=10200
- National Institute of Occupational Safeth and Health (NIOSH). EMF Electric and magnetic fields associated with the use of electric power. Questions and Answers 2002
- National Institute of Occupational Safeth and Health (NIOSH). Job exposure matrix for power-frequency magnetic fields. [Accessed 2022 Oct 28]; Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/topics/emf/jempowerfreq/jempowerfreq.html>
- Occupational Safety and Health Agency(OSHA). Extremely Low Frequency (ELF) Radiation. [Accessed 2022 28 Oct]; Available from: <https://www.osha.gov/elf-radiation/standards>
- Portier C ,Wolfe M S. Assessment of health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields: NIEHS Working Group Report. 1998
- Renew D, Cook R, Ball M. A method for assessing occupational exposure to power-frequency magnetic fields for electricity generation and transmission workers. *Journal of Radiological Protection* 2003; 23(3): 279
- Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL). Electro smog in the environment. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, Bern, 2005
- Schüz J ,Ahlbom A. Exposure to electromagnetic fields and the risk of childhood leukaemia: a review. *Radiation protection dosimetry* 2008; 132(2): 202-211
- Stam R. Comparison of international policies on electromagnetic fields:(power frequency and radiofrequency fields). Bilthoven, National Institute for Public Health and the Environment, RIVM, 2018.
- Udroiu I et al. Genotoxicity induced by foetal and infant exposure to magnetic fields and modulation of ionising radiation effects. *Plos one* 2015; 10(11): e0142259
- World Health Organization(WHO). World Health Organization. *Environmental Health Criteria*: 238.

Extremely low frequency fields. Geneva, World Health Organization, 2007a

World Health Organization(WHO). Electromagnetic fields and public health: exposure to extremely low frequency fields. Fact Sheet No 322. Geneva, World

Health Organization, 2007b

<저자정보>

박동욱(교수), 이승희(조교), 조경이(박사수료)