

극저주파 자기장의 소아백혈병 발생 위험 고찰

박동욱*

한국방송통신대학교 보건환경학과

Review on the Association between Exposure to Extremely Low Frequency-Magnetic Fields (ELF-MF) and Childhood Leukemia

Dong-Uk Park*

Department of Environmental Health, Korea National Open University

ABSTRACT

Background: The association between exposure to extremely low frequency-magnetic fields (ELF-MF) and childhood leukemia has been controversial. There is a need to clarify this relationship by summarizing key conclusions from systematic review articles.

Objectives: The major aim of this study is to summarize key conclusions from systematic review articles on the association between exposure to ELF-MF and childhood leukemia based on childhood exposure to ELF-MF, proximity from childhood household to high voltage cables, and parental occupational exposure to ELF-MF.

Methods: This study was conducted through a brief literature review focusing on systematic, meta-analysis, and pooled analysis methods. We conducted a literature search in PubMed using the key words “ELF-MF” and “childhood leukemia” singly or combined.

Results: In 2002, the World Health Organization (WHO)’s International Agency for Research on Cancer (IARC) reviewed two manuscripts to conduct pooled analysis and concluded that there is a significant association between exposure to $>0.3 \mu\text{T}$ or $0.4 \mu\text{T}$ and childhood leukemia. We found a total of four manuscripts for systematic or pool analysis that have been published since the IARC’s conclusion. They consistently concluded that there was a significant association between exposure to $>0.4 \mu\text{T}$ and childhood leukemia compared to ELF-MF exposure to below $0.1 \mu\text{T}$. The proximity of children’s households to high voltage cable lines and occupational exposure by their parents to ELF-MF during certain periods prior to or during pregnancy were inconsistently associated with childhood leukemia. The study found that many EU countries have implemented precautionary policies to prevent potential childhood leukemia due to exposure to ELF-MF.

Conclusions: This study recommends implementing a precautionary policy that includes legal exposure limits for ELF-MF to minimize exposure to ELF-MF.

Key words: Extremely low frequency-magnetic fields (ELF-MF), electromagnetic fields (EMF), childhood leukemia, precautionary policy

Received March 10, 2023

Revised March 22, 2023

Accepted March 30, 2023

Highlights:

- The association between exposure to extremely low frequency-magnetic field (ELF-MF) and childhood leukemia has been controversial.
- We found a significant association between exposure to ELF-MF $>0.4 \mu\text{T}$ and childhood leukemia, compared to exposure to ELF-MF below $0.1 \mu\text{T}$.
- Precautionary policy to minimize exposure to ELF-MF should be implemented.

*Corresponding author:

Department of Environmental Health,
 Korea National Open University, 86
 Daehak-ro, Jongno-gu, Seoul 03087,
 Republic of Korea
 Tel: +82-2-3668-4707
 Fax: +82-2-741-4701
 E-mail: pdw545@gmail.com

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. 전자파

의 전기장은 피부, 나무, 건물 등 물체에 의해 쉽게 차단되고 약해지지만, 자기장은 피부 등 대부분의 물체를 통과한다. 표준 주파수(유럽 50 Hz, 우리나라 등 60 Hz)를 사용하는 송전선로, 전선, 각종 전기기와 생활 제품에서는 낮은 주파수 대역(1~300 또는 400 Hz)인 극저주파(extremely low frequency, 이



하 ELF)의 에너지가 발생한다.

1970년대부터 극저주파 자기장(이하 극저주파)의 만성적인 노출과 암 등의 질병 위험은 끊임없이 보고되고 있다.¹⁾ 극저주파 자기장 노출로 인한 잠재적 건강위험은 암(백혈병, 뇌암, 유방암 등), 신경 퇴행성 질환, 생식독성, 전자파 과민증(electromagnetic hyper sensitivity, 이하 EHS) 등으로, 연관성과 인과성이 논란 중이다. 많은 연구에서 극저주파 자기장의 잠재적 건강 영향에 관심을 두고 있다.²⁾ 2002년 세계보건기구(WHO)의 국제 암 연구소(International Agency of Research on Cancer, IARC)에서는 극저주파 자기장 등 전자파 노출을 암 발생 위험 가능성(possible, 2B)이 있다고 분류했다.³⁾ 그러나 전자파의 암 발생 위험을 규명한 역학연구로부터 얻은 결과에서 인과관계가 아직 제한적이며(limited), 동물실험 연구에서도 증거가 불충분하다고(inadequate) 판단한다.

1979년에 Wertheimer와 Leeper⁴⁾가 처음으로 높은 전류가 흐르는 전기 배선(electrical wiring codes)이 지나가는 지역 근처 가정에 사는 아이들에게서 소아백혈병을 포함한 소아암 발생이 유의하게 높다고 보고했다. 이후로 극저주파 자기장 노출로 인한 소아백혈병 발생 위험을 규명하기 위한 역학연구가 다른 암종에 비해 상대적으로 많이 진행되며, 비교적 일관적인 인과관계가 보고되고 있다. WHO는 극저주파 자기장 노출 기여로 인한 소아백혈병 사례를 세계적으로 100~2,400명(0.2~4.95%)으로 추정했다.⁵⁾

본 연구의 목적은 극저주파 자기장 노출과 소아백혈병 위험과의 연관을 연구한 역학조사 결과를 종합하고, 극저주파 노출을 줄이기 위한 유럽연합(EU)의 사전주의 정책(precautionary policy)을 소개하는 것이다. 구체적인 목적은 첫째, 극저주파 자기장 노출수준, 아이의 거주 지역과 고압송전선로 시설과의 거리 등의 노출 변수와 소아백혈병 발생 위험과의 관계를 종합하고, 둘째, 부모의 직업적 극저주파 자기장 노출과 소아백혈병

발생 위험과의 관계를 종합하며, 마지막으로 극저주파 자기장 노출을 줄이기 위한 국내외 사전주의 정책을 종합하고 비교하는 것이다. 본 연구의 결과는 우리나라에서 극저주파 자기장 노출로 인한 잠재적 건강위험을 예방하는 정책과 연구에 활용되리라 기대한다.

II. 재료 및 방법

본 연구는 문헌 고찰(literature review)을 통해서 이루어졌다. 극저주파 노출수준과 소아백혈병과의 위험을 보고한 논문 중 고찰 논문만을 대상으로 주요 내용과 결론을 종합했다. 또한 아이들의 거주 지역(집)과 고압송전선로의 거리, 부모의 직업적 극저주파 자기장 노출과 소아백혈병과의 위험을 보고한 역학연구의 주요 내용과 결론을 종합했다. 문헌 검색은 PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>)를 이용했다. 주요 검색 용어는 'extremely low frequency magnetic field', 'childhood leukemia' 등으로 개별 혹은 조합했다. 역학연구 결과 중 극저주파 자기장 노출과 소아백혈병 발생 위험과의 일관성을 중심으로 정리했다.

III. 결 과

1. 극저주파 자기장 노출수준과 소아백혈병

2002년에 WHO 국제 암 연구소 워킹 그룹은 연구 결과를 비교적 신뢰할 만한 2000년 이전의 논문 12편과 9편을 각각 고찰한 결과, 0.3 μT 와 0.4 μT 이상의 극저주파 자기장에 노출된 그룹에서 소아백혈병의 위험이 0.1 μT 의 극저주파 자기장에 노출된 그룹에 비해 유의하게 높음을 발견했다(Table 1).^{6,7)}

Brabant 등(2022)⁸⁾은 2018년까지 극저주파 자기장 노출과 소아백혈병 위험과의 연관을 보고한 역학연구 결과를 메타분

Table 1. Key results from pooled analysis studies on ELF-MF and childhood leukemia, cited in IARC's evaluation of ELF-MF as a possible carcinogen

Authors (year)	Type of study	No. of studies reviewed	Key results and conclusions
Greenland et al. (2000) ⁷⁾	Pooled analysis	12 case-control studies	- No association between childhood leukemia and ELF-MF exposure to <0.3 μT compared with <0.1 μT as the reference level - Significant association for exposure to >0.3 μT (OR: 1.7, 95% CI: 1.2~2.3) - No association of wire codes*
Ahlbom et al. (2000) ^{6)†}	Pooled analysis	9 studies involving 3,203 children with leukemia and 10,338 control children	- No association between childhood leukemia and ELF-MF exposure <0.4 μT compared with <0.1 μT as the reference level - Significant association for exposure to >0.4 μT (OR: 2.00, 95% CI: 1.27~3.13)

ELF-MF: extremely low frequency-magnetic fields, IARC: International Agency Research on Cancer, OR: odds ratio, CI: confidence interval.

*Including magnetic field exposure calculated from configuration and electric load data; direct magnetic field measurements; wire code.

†With 24/48-hour magnetic field measurements.

Table 2. Key conclusions summarized from studies performing systematic review and meta-analysis examining the relationship between ELF-MF and childhood leukemia, post- IARC evaluation in 2002

First author (year)	Type of study	No. of studies reviewed or pooled	Key results and conclusions
Brabant et al. (2022) ⁸⁾	Systematic review and meta-analysis	38 case-control studies	- Significant association between childhood leukemia and ELF-MF (21 studies, pooled OR=1.26; 95% CI: 1.06~1.49) - In 12 studies, >0.4 μ T: pooled OR=1.37; 95% CI: 1.05~1.80; acute lymphoblastic leukemia alone. In seven studies, >0.4 μ T (pooled OR=1.88; 95% CI: 1.31~2.70) compared with exposure to <0.1 μ T as the reference level - No significant association with exposure to 0.1~0.2 μ T and 0.2~0.4 μ T (OR=1.07; 95% CI: 0.87~1.30)
Seomun et al. (2021) ²⁹⁾	Systematic review and meta-analysis	30 case-control studies	- Children exposed to 0.2-, 0.3-, and 0.4- μ T ELF-MFs had 1.26 (95% CI: 1.06~1.49), 1.22 (0.93~1.61), and 1.72 (1.25~2.35) times higher odds of childhood leukemia
Zhao et al. (2014) ³⁰⁾	Meta-analysis	9 studies	- Compared with exposure to <0.2 μ T as the reference level, significant association between magnetic field intensity \geq 0.2 μ T and childhood leukemia was found (OR=1.31, 95% CI: 1.06~1.61) - Significant association between exposure to \geq 0.4 μ T and childhood leukemia (for total leukemia: OR=1.57, 95% CI: 1.03~2.40; for acute lymphocytic leukemia: OR=2.43, 95% CI: 1.30~4.55)
Schüz (2011) ³¹⁾	Update of the epidemiological evidence	Not applicable	- Approximately two-fold risk increase at ELF-MF exposures \geq 0.4 μ T, and demonstrate consistency of studies across countries, with different designs, different methods of exposure assessment, and different systems of power transmission and distribution - OR 2.61 (95% CI: 1.73 to 3.94) calculated for less than 600 meters from the nearest lines against more than 600 meters

ELF-MF: extremely low frequency-magnetic fields, OR: odds ratio, CI: confidence interval.

석을 통해 정리했다(Table 2). 이 논문에서는 총 863편의 문헌 중 연구가 잘 수행된 38편을 고찰했다. 극저주파 자기장에 대한 정량적 노출평가 결과(<0.2 μ T vs. >0.2 μ T), 아이의 집과 송전선로와의 거리(>200 m vs. <200 m), 그리고 전류 크기(wire codings [low current configuration vs. high current configuration])를 범주화해 소아백혈병 위험을 비교했다. 그 결과, 0.4 μ T 이상의 극저주파 자기장에 노출된 그룹에서 유의한 수준의 소아 급성 림프구성 백혈병(acute lymphoblastic leukemia, ALL)이 발견되었다. 12개 연구에서는 0.4 μ T 이상의 극저주파 자기장 노출수준이 1.37배(95% CI: 1.05~1.80), 7개 연구에서는 1.88배(95% CI: 1.31~2.70)였다. 0.4 μ T 이하의 극저주파 자기장에 노출된 그룹에서는 유의성이 관찰되지 않았다.

2. 고압송전선로 주변 거주 특성과 소아백혈병

아이들이 거주한 집과 고압송전선로와의 거리, 송전선로 고압 수준 등의 특성과 소아백혈병과의 연관성에 대해서는 일관된 결과가 없었다. 고압송전선로에서 50 m 이내에 거주하는 아이들의 소아백혈병 발생이 300 m 또는 600 m 밖에 거

주하는 아이들에 비해 유의하게 높다는 연구도 있었지만, 유의하지 않다는 연구도 있었다. Crespi 등(2019)⁹⁾에 따르면, 고압송전선로 시설 50 m 이내에 거주하고 극저주파 자기장 노출이 0.4 μ T 이상인 아이들 그룹이 먼 거리에 거주하는 아이들 그룹에 비해 소아백혈병 발생이 유의하게 높았다(Table 3). Draper 등(2005)¹⁰⁾은 영국과 웨일스에서 집과 고압송전선로(132 kV, 275 kV, 400 kV)와의 거리가 소아백혈병 발생과 유의한 연관이 있다고 보고했다. 이 연구에 따르면, 소아백혈병이 발생한 아이들의 약 4%가 고압송전선로에서 600 m 이내에 위치한 집에서 살고 있다. 만약 본 연구의 인과가 있다면 소아백혈병의 약 4%가 고압송전선로에서 발생한 극저주파 자기장에 의해 발생한 셈이다.

3. 부모의 직업적 극저주파 자기장 노출과 소아 자녀 백혈병

부모의 임신 전후 일정 기간 직업적 극저주파 자기장 노출 및 노출수준 등과 태어난 아이들의 백혈병 위험에 대한 연구를 종합했다(Table 4). 이에 대한 연구는 아이들의 직접적 극저주파 자기장 노출과 소아백혈병 위험 연구에 비해 상대적으로 많지

Table 3. Summaries of studies investigating the association between childhood leukemia and distance of residence from power lines

First author (year)	Type of study	No. of studies reviewed	Key results and conclusions
Brabant et al. (2022) ⁸⁾	Systematic review and meta-analysis	38 case-control studies	<ul style="list-style-type: none"> - No association ORs for living within 50 m and 200 m of power lines and with wire codings - Significant relationship with exposure to electric blankets (four studies, pooled OR=2.75; 95% CI: 1.71~4.42) and, to a lesser extent, electric clocks (four studies, pooled OR=1.27; 1.01~1.60)
Crespi et al. (2019) ⁹⁾	Case-control study	NA	<ul style="list-style-type: none"> - Elevated risk was confined to the group that was both very close to high voltage lines: >200 kV (<50 m) and >0.4 μT, compared to >600 m and 0.1 μT - >600 m and <0.1 μT: reference - <50 m and <0.4 μT: OR 0.81 (95% CI: 0.35, 1.88) - >50 m and \geq0.4 μT: OR 0.50 (95% CI: 0.15, 1.67) - <50 m and \geq0.4 μT: OR 4.06 (95% CI: 1.16, 14.3)
Amoon et al. (2018) ²³⁾	29,049 cases and 68,231 controls	Pooled analysis from 11 record-based studies.	<ul style="list-style-type: none"> - Among children living <50 m from >200 kV power lines the adjusted OR for childhood leukemia was 1.33 (95% CI: 0.92~1.93), compared with >300 m
Bunch et al. (2015) ³²⁾	52,525 cases with matched birth controls		<ul style="list-style-type: none"> - No indications of an association of childhood leukemia risk with distance or of trend in risk with increasing magnetic field for leukemia ORs: distance 0.99 (0.95~1.03), magnetic field 1.01 (0.76~1.33) - Underground power line voltage studied: 275 kV, 400 kV
Pedersen et al. (2014) ³³⁾	1,698 cases aged <15 diagnosed with leukemia during 1968~2006	NA	<ul style="list-style-type: none"> - No higher risk of leukemia for children living 0~199 m or for children living 200~599 m from a 132~400 kV overhead power line compared to children who lived \geq600 m away
Sohrabi et al. (2010) ²²⁾	Case-control study of 300 children aged 1~18 years with confirmed ALL		<ul style="list-style-type: none"> - OR of 2.61 (95% CI: 1.73 to 3.94) calculated for less than 600 meters from the nearest lines against more than 600 meters - OR: 9.93 (95% CI: 3.47 to 28.5) for 123 KV, 10.78 (95% CI: 3.75 to 31) for 230 KV and 2.98 (95% CI: 0.93 to 9.54) for 400 KV lines
Kroll et al. (2010) ³⁴⁾	Case-control study: 28,968 children		<ul style="list-style-type: none"> - The estimated relative risk; 1.14 (95% CI: 0.57~2.32) for leukemia, 0.80 (0.43~1.51) for brain tumor, and 1.34 (0.84~2.15) for other cancers - 275 kV, 400 kV and the few 132 kV lines (<1 % of the total were at this voltage)
Abdul Rahman et al. (2008) ³⁵⁾	A total of 128 case subjects and 128 control subjects aged below 15 years		<ul style="list-style-type: none"> - Occurrence of acute leukemia among children was strongly associated with 200 m or less distance of the house from power lines (OR 2.30, 95% CI: 1.18~4.49) - Adults who had lived within 300 m of a power line during the first 15 years of life had a threefold increase in risk (OR 3.23; 1.26~8.29) - No information about power line voltage

Table 3. Continued

First author (year)	Type of study	No. of studies reviewed	Key results and conclusions
Lowenthal et al. (2007) ³⁶⁾	Case-control study of 854 patients diagnosed with lymphoproliferative disorders (LPD) or myeloproliferative disorders (MPD) (including leukemia, lymphoma and related conditions) aged 0~94 years		- Child aged 0~5 years who had lived within 300 m of a power line had a fivefold increase in risk (OR 4.74; 0.98~22.9) - Power line voltage studied: 88 kV, 110 kV, 220 kV
Draper et al. (2005) ¹⁰⁾	29,081 children with cancer, including 9,700 with leukemia		- Compared with those who lived >600 m from a line at birth, children who lived within 200 m had a relative risk of leukemia of 1.69 (95% confidence interval 1.13 to 2.53); those born between 200 and 600 m had a relative risk of 1.23 (1.02 to 1.49) - Power line voltage studied: 132 kV, 275 kV, 400 kV

Table 4. Brief summaries of studies examining the relationship between parental occupational exposure to ELF-MF and childhood leukemia

Authors (year)	Type of study	No. of studies reviewed	Key results and conclusions
Talibov et al. (2019) ³⁷⁾	Pooled analysis	11 case-control studies including 9,723 childhood leukemia cases and 17,099 controls	- Paternal ELF-MF exposure >0.2 μ T at conception was 1.04 (95% CI: 0.95 to 1.13) for ALL and 1.06 (95% CI: 0.87 to 1.29) for AML, compared with \leq 0.2 μ T - No significant associations between parental occupational ELF-MF exposure and childhood leukemia
Su et al. (2016) ¹¹⁾	Meta-analysis	11 case-control and one cohort study	- Significant association when pooling studies with small numbers of cases (OR=1.96; 95% CI: 1.03~3.74) or with lower quality score (OR=1.52; 95% CI: 1.07~2.15). Association unconfirmed when pooling studies with large number of cases
Hug et al. (2010) ³⁸⁾	Case control study: 2,382 controls and 2,049 cases (846 children with acute leukemia, 159 children with non-Hodgkin's lymphoma)	NA	- No increased cancer risks in children with fathers occupationally exposed to >0.2 μ T. No evidence for a risk increases at >1 μ T

않았다. Su 등(2016)¹¹⁾은 고찰한 논문 중 일부 결과를 종합해서 유의한 연관(OR=1.96; 95% CI: 1.03~3.74)을 발견했지만, 전체 분석에서는 이러한 연관을 확인하지 못했다. 본 연구에서 종합한 연구 대부분에서 유의성을 발견하지 못했다.

4. 사전주의 정책(precautionary policy)

EU 국가의 극저주파 자기장 등 전자파 노출 억제를 위한 사전주의 정책들을 네덜란드 공중보건환경연구소(National Institute for Public Health and the Environment, RIVM)가 보고한 문헌에서 요약했다(Table 5).¹²⁾ 사전주의 정책은 대부분 국가가 지자체 또는 전력회사에 권고한다. 대부분 고압송전선로 근처에 공중보건 시설, 특히 어린이 거주 시설, 병원, 나아가 시민 거주 시설을 설치함으로써 발생하는 극저주파 자기장 노출을 줄이기 위한 정책들이다. 극저주파 자기장의 소아백혈병 위험을 보고한 역학연구 논문이나 부모의 임신 전후 극저주파

등 전자파 노출에 대한 건강위험에 대해서는 과학적 논란이 있으나(Table 4), 극저주파 자기장 노출에 우려가 있는 만큼 이를 최대한 억제하기 위해 시행된다.

IV. 고 찰

본 연구는 역학연구 문헌을 고찰해서 극저주파 자기장과 소아백혈병 건강위험 사이의 관계를 종합했다. 2002년 WHO IARC는 극저주파 자기장 노출로 인해 소아백혈병이 발생할 가능성이 있다고 평가했다. 이 평가의 주요 근거로 삼은 두 편의 고찰 논문에서 극저주파 자기장의 유의한 노출 경계는 0.3 μ T로, 0.3 μ T 이상의 극저주파 자기장에 평균적으로 만성노출된 그룹에서 노출수준이 0.1 μ T 미만인 그룹에 비해 백혈병이 유의한 수준으로 많이 발생했다고 보고했다(Table 1).

WHO 고찰 이후 지금까지 4편의 고찰 논문이 발표되었다.

Table 5. Precautionary policies implanted in EU countries to minimize ELF-MF exposure, abstracted from the report by the National Institute for Public Health and the Environment as reported by RIVM in the Netherlands¹²⁾

Country*	Major contents related to precautionary policies
France	<ul style="list-style-type: none"> - A ministerial recommendation advises Prefectures to avoid as far as possible the creation of new hospitals, maternity wards, and childcare facilities near power lines, cables, transformers and bus bars where children would be exposed to a magnetic field stronger than 1 μT - For new or modified electricity infrastructure, the grid operator usually tries to avoid as much as possible the creation of new electricity infrastructure near such locations - The grid operator has the legal obligation to monitor the strength of EMF near power lines - Citizens can also request information about the strength of EMF from power lines via the local mayor
Germany	<ul style="list-style-type: none"> - National legislation requires that all possibilities to minimize EMF should be exhausted in accordance with the technical state of the art when creating or substantially modifying direct current and alternating current facilities with voltages greater than 1 kilovolt - High-voltage power lines for alternating current on a newly planned route may not pass over buildings meant for the long-term stay of people - The obligation to minimize EMF only applies to locations with homes, hospitals, schools, childcare facilities, playgrounds or any other location not exclusively meant for the temporary stay of people
Luxemburg	<ul style="list-style-type: none"> - A ministerial recommendation was made not to create any new living spaces in the immediate vicinity of overhead power lines (within 20 meters for 65 kilovolt lines and 30 meters for 100 to 220 kilovolt lines)
Austria	<ul style="list-style-type: none"> - A panel of experts appointed by the relevant authority for new electricity lines requiring environmental impact assessments usually requires compliance with a maximum magnetic flux density of 1 μT (1% of the reference level in the EU recommendation)
Denmark	<ul style="list-style-type: none"> - A recommendation in 1993 advises not to build new homes or children's institutions close to power lines or new power lines close to homes or children's institutions - Guidelines for situations where measures at reasonable cost to reduce the magnetic field must be investigated
Finland	<ul style="list-style-type: none"> - Recommendations are in place to avoid the construction of permanent residences in areas where the magnetic flux density continuously exceeds a level of approximately 0.4 μT
Netherlands	<ul style="list-style-type: none"> - Recommendations are in place advising local authorities and grid companies to avoid as far as reasonably possible creating new situations with long-term stay of children in areas around overhead high-voltage power lines with an annually averaged magnetic flux density greater than 0.4 μT
UK	<ul style="list-style-type: none"> - The government supports the implementation of low-cost options such as optimal phasing to reduce the magnetic field from overhead power lines - Additional exposure reduction by creating exclusion zones between homes and power lines is considered disproportionate in the light of the evidence on the potential health risks - The government supports exploring the reinforcement of best practices for wiring of distribution circuits and providing consistent, helpful, and proportionate public health messages to raise awareness

*References from each country were not cited. Major policies from each country were summarized from reference 12.

이 연구들에 따르면, 0.4 μ T 이상의 극저주파 자기장에 노출된 아이들의 백혈병 발생이 0.1 μ T 미만으로 노출된 아이들보다 유의하게 높았다(Table 2). 고압송전선로 근처에 거주하는 아이들의 백혈병 발생 위험 특성에 대해서는 일관된 결론이 나지 않았다. 연구마다 고압송전선로와 거주 공간과의 거리, 송전선로의 고압 수준 등에 차이가 있었기 때문이다. 고압송전선로에서 50 m 이내에 거주하는 아이들의 백혈병 발생 사례가 300 m 또는 600 m 밖에 거주하는 아이들에 비해서 유의하게 높다는 연구도 있었지만, 유의하지 않다는 연구도 있었다. 한편, 부모의 아이 임신 전후 일정 기간 직업적 극저주파 자기장 노출과 아이들의 백혈병 발생 위험은 유의하지 않았다(Table 4). 역학연구에서 평가한 부모의 직업적 극저주파 자기장 강도는 대략 1 μ T 이하였고, 이보다 높은 노출에 따른 건강위험은 아직 연구되지

않은 것으로 파악했다. 19세 이하 급성 소아백혈병 등의 환경적 요인은 부모의 농약 노출과 감염 등의 유의한 요인을 제외하고 구체적으로 규명되지 않았다.¹³⁾

많은 나라에서 WHO 권고 기준인 0.3 μ T 또는 0.4 μ T를 극저주파 만성노출을 줄이기 위한 기준으로 삼고 있다. 국제비이온화방사선보호위원회(the International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection, 이하 ICNIRP)의 공식적인 견해는 각국의 건강위험 예방 정책에 따라 극저주파 만성노출로 인한 영향을 다루어야 한다는 것이다. 실제로 많은 나라에서 극저주파 등 전자파 노출을 피하거나 줄이기 위한 노출 또는 허가 기준 설정 등 다양한 사전주의 정책을 펼치고 있다.^{14,15)} 그러나 우리나라에서는 극저주파 등 전자파 노출을 관리하고 줄이기 위한 정책이 마련되어 있지 않다. 극저주파 등 전자파에 생

물학적으로 민감한 어린아이, 임산부, 환자 등을 보호하기 위한 제도 역시 고려한 적 없다. 이에 다음과 같이 극저주파 등 전자파 노출을 줄이기 위한 여러 제도적 고찰이 요구된다.

첫째, 어린아이, 임산부, 환자 등 전자파에 민감한 인구 그룹은 물론 일반인의 잠재적 건강 보호를 위해 극저주파 자기장 만성노출을 줄이기 위한 정부의 사전주의 정책이 필요하다. 극저주파 등 전자파 노출과 각종 암,¹⁶⁾ 퇴행성 신경질환,¹⁷⁾ 생식독성¹⁸⁾ 등과의 인과관계는 논란 중이며, 미국, 유럽 등은 사전주의 원칙에 근거해 극저주파 등 전자파의 잠재적 건강 영향을 관리하고 있다.¹⁴⁾ WHO는 가정에서 0.3~0.4 μT 이상의 극저주파 자기장 노출은 드물며, 대략 1~4%는 평균 0.3 μT 이상, 그리고 1~2%는 중위수(median) 0.4 μT 이상에 노출된다고 추정했다. 가정에서 극저주파 자기장 노출수준은 유럽연합에 속한 국가가 대략 0.025~0.07 μT , 미국이 0.055~0.11 μT 로 추정했다. Gajšek 등(2016)¹⁹⁾은 15개 유럽연합 국가에서 보고된 극저주파 자기장 노출수준을 고찰한 결과를 근거로 일반인의 약 0.5%가 집 밖의 고정된 극저주파 발생원인 고압송전선로, 전기교통선로에서 만성적으로 0.2 μT 이상의 극저주파 자기장에 노출된다고 발표했다. 그리고 높은 극저주파 자기장 노출은 내장된 변압기가 있는 아파트에서 측정되었다고 보고했다.

둘째, 우리나라의 일반인에 대한 극저주파 자기장 노출 기준(인체보호기준으로 칭함)은 과학기술정보통신부(과기부)가 고시한 83.3 μT 이다. 한편, 산업통상자원부 고시인 전기설비기술기준(제17조)에서는 특고압 가공송전선을 지표상 1 m에서 전자파가 83.3 μT (=833 mG) 이하가 되도록 시설하는 등 사람에게 위험을 줄 우려가 없도록 해야 한다고 발생원의 강도를 명시했다. 인체보호기준과 전기설비기술기준에서의 극저주파 자기장 기준은 같지만($5/f=5/0.06=83.3$, 여기서 $f=\text{kHz}$), 관리 부처와 인체보호기준 개념은 다르다. 우리나라 극저주파 자기장 인체보호기준은 1998년에 ICNIRP가 60 Hz에서 발생한 극저주파 자기장의 단시간 노출로 인한 급성 건강 영향(acute effect)을 예방하기 위해 권고한 기준이다. 2010년 ICNIRP는 이 기준을 200 μT 로 높게 개정했다. 그러나 이 기준은 극저주파 노출로 나타날 수 있는 신경 자극, 망막 섬광 등 급성 건강피해를 예방하기 위한 상한치 또는 한계치 개념이다. 생활환경에서 일반인이 우리나라 인체보호기준 83.3 μT 를 순간은 물론 만성적으로 초과해서 노출되는 경우는 거의 없다. 따라서 이 노출 기준으로 소아백혈병 등 만성질환 위험을 예방할 수는 없다. 유럽환경의학 학술단체(European Academy for Environmental Medicine, EUROPAEM)가 일반인의 극저주파 자기장 1일 평균 노출 기준을 최대 0.1 μT 로 권고한 사례는 있다.²⁰⁾ 극저주파 자기장 노출이 일으킬 수 있는 암, 생식독성 등 만성적인 질병 위험을 예방하기 위한 만성노출 수준은 급성 영향 예방을 위한 과기부의 인체보호기준 및 ICNIRP 기준과는 다르다.

셋째, 고압송전선로 시설 근처 거주자 또는 이용자를 보호하

기 위한 조치가 필요하다. 고압송전선로를 포함한 전자파 발생 시설의 위치별 주변 거주 특성 등의 분포에 대한 국가 자료는 없다. 현재 고압송전선로 등 전자파 발생 시설은 환경영향평가법에 따라 환경은 물론 지역 주민 건강에 영향을 미치는 시설에 해당되지 않는다. 환경영향평가법 시행령 별표 3²¹⁾에서 환경영향평가 대상 송전선로의 전압 경계는 345 kV이고, 지상 송전선로로서 선로 길이 10 km 이상이다. 그러나 본 연구에서 고찰한 역학연구에 따르면, 123 kV의 송전선로에서 600 m 이내,²²⁾ 또는 200 kV의 송전선로에서 50 m 이내²³⁾의 지역에서 거주한 아이들의 백혈병 발생 위험이 높다고 보고한 연구들이 있다. 400 kV 지중 고압선로(underground cables)의 지표면에서 측정된 극저주파 자기장은 30 μT 이상이며, 지표면 위 2 m에서는 10 μT 로 감소한다. 이처럼 고압송전선로 등 발생원으로부터 거리가 멀어질수록 극저주파 자기장의 강도는 급격히 감소한다.²⁴⁻²⁶⁾ 영국에서 258곳의 가정을 대상으로 수행한 연구에 따르면, 가정에서 극저주파 자기장 노출에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 100 m 이내에 132 kV 이상의 고압송전선로가 있는지 여부였다. 고압송전선로에서 100 m 이내에 위치한 가정에서 측정된 시간 가중 기하평균 극저주파 자기장 강도는 약 0.2 μT 였고, 100 m보다 떨어진 가정에서는 약 0.054 μT 로 보고했다.⁵⁾ Jung 등(2019)²⁷⁾은 우리나라의 154 kV, 345 kV 고압 지중 송전선 134개 지점에서 이격 거리별 방출량을 비교했다. 이 연구에 따르면, 직상 지점에서 지중송전선의 극저주파 자기장 방출량은 154 kV의 경우 $1.5 \pm 2.4 \mu\text{T}$ (GM: 0.78 μT), 345 kV의 경우 $0.6 \pm 0.2 \mu\text{T}$ (GM: 0.57 μT)였다. 직상 지점에서부터 약 10 m 이격된 거리에서는 0.4 μT 였다.

많은 나라에서 극저주파 자기장을 포함한 전자파 발생 시설 설치를 관리하고 있다. 스위스는 극저주파 자기장이 1 μT 가 넘는 지역에 유치원, 초등학교, 병원과 같은 민감 시설을 세우지 않도록 했다. 네덜란드와 덴마크도 극저주파 자기장이 0.4 μT 가 넘는 곳에 학교 등 어린이가 상당 시간 머무르는 시설을 신설하지 않도록 권고한다. 미국은 주에 따라 다르지만, 미네소타주나 뉴욕주에서는 전압의 차이에 따라 15~20 μT 를 최대 기준으로 활용한다. 환경부는 시민의 공중보건에 영향을 미칠 수 있는 환경영향평가 항목 중 생활환경 영역에 속하는 고압송전선로의 전기적 특성을 다시 검토할 필요가 있다. 극저주파의 건강위험을 과학적으로 규명하기 위해 극저주파 노출 기준의 한계를 이해하고, 이를 바탕으로 극저주파 노출수준을 가능한 정확하게 평가해야 한다. 극저주파 자기장의 잠재적 건강위험으로부터 시민의 건강을 보호하기 위해 고압송전선로 시설의 종류, 고압송전선로 시설과 주거지역·시민 활동 공간과의 거리별·시간별 극저주파 발생 강도, 고압송전선로 시설이 지역 주민의 잠재적 건강위험에 미칠 수 있는 건강 영향 추정 등을 종합적으로 검토해서 환경영향평가법의 개정 여부를 검토할 필요가 있다. 개인의 극저주파 등 전자파 노출은 거주지, 생활환경,

소비활동, 사용하는 전기 제품의 종류와 사용 패턴, 동선 등의 특성에 따라 크게 다를 수 있다. 또한 전자파 발생 시설로부터 극저주파 등 전자파 노출을 피하거나 제거 또는 감소시킬 수 있는 방안을 마련했는지 여부가 인허가 등의 행위 전에 평가되어야 한다.

마지막으로, 어린이, 임산부 등 전자파에 민감한 인구 그룹은 물론 일반 성인들도 정부 정책과 상관없이 극저주파 자기장 등 전자파 노출을 줄이는 노력이 필요하다. 극저주파 자기장이 많이 발생한다고 알려진 손 선풍기,²⁸⁾ 헤어드라이어, 전기담요, 전자레인지, 에어프라이어 등을 포함한 전기 제품 사용을 줄이고, 사용하더라도 가능하면 인체와 직접 닿지 않도록 멀리 떨어뜨리는 것이 좋다. 전기 제품이 편리하지만 잠재적 건강위험의 우려가 있음을 인식하고 제품을 현명하게 사용해야 한다.

V. 결 론

본 연구는 역학연구 문헌을 고찰해서 극저주파 자기장과 소아백혈병 건강위험의 관계를 종합했다. 2002년 WHO IARC는 두 편의 논문을 고찰하고, 극저주파 자기장 노출 강도 0.3 μT 이상인 그룹에서 0.1 μT 미만에 비해 백혈병이 유의하게 발생했음을 보고했다. 2002년 이후 보고된 4편의 고찰 논문에서 비교적 일관되게 내린 결론은 0.4 μT 이상의 극저주파 자기장에 노출된 아이들의 백혈병 발생이 0.1 μT 미만의 극저주파 자기장에 노출된 그룹보다 유의하게 높다는 것이다. 그러나 고압 송전선로 근처에 사는 아이들의 거주 특성 및 부모의 아이 임신 전후 일정 기간 직업적 극저주파 자기장 노출 특성과 소아백혈병 발생 위험과의 연관성에는 일관성이 없었다. 아이들이 극저주파 자기장에 직접적으로 노출되지 않도록 하는 한편, 부모의 극저주파 자기장 노출을 줄일 사전주의 정책이 필요하다. 극저주파 자기장 민감 그룹인 아이들과 임산부, 환자는 물론, 일반인의 극저주파 자기장 노출을 줄이기 위한 적극적인 대책을 제안한다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. WHO. Electromagnetic Fields and Public Health: Exposure to Extremely Low Frequency Fields. Available: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/exposure-to-extremely-low-frequency-field> [accessed 5 March 2023].

2. National Institute of Environmental Health Sciences. EMF-Electric and Magnetic Fields Associated with the Use of Electric Power. Questions & Answers. Bethesda: National Institutes of Health; 2002.
3. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Health Phys.* 1998; 74(4): 494-522.
4. Wertheimer N, Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol.* 1979; 109(3): 273-284.
5. WHO. Environmental Health Criteria Monograph No. 238: Extremely Low Frequency Fields. Geneva: WHO; 2007.
6. Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, et al. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukemia. *Br J Cancer.* 2000; 83(5): 692-698.
7. Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C, Kelsh MA. A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. Childhood Leukemia-EMF Study Group. *Epidemiology.* 2000; 11(6): 624-634.
8. Brabant C, Geerinck A, Beudart C, Tirelli E, Geuzaine C, Bruyère O. Exposure to magnetic fields and childhood leukemia: a systematic review and meta-analysis of case-control and cohort studies. *Rev Environ Health.* 2022. doi: 10.1515/reveh-2021-0112. [Epub ahead of print]
9. Crespi CM, Swanson J, Vergara XP, Kheifets L. Childhood leukemia risk in the California Power Line Study: magnetic fields versus distance from power lines. *Environ Res.* 2019; 171: 530-535.
10. 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.
11. Su L, Fei Y, Wei X, Guo J, Jiang X, Lu L, et al. Associations of parental occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields with childhood leukemia risk. *Leuk Lymphoma.* 2016; 57(12): 2855-2862.
12. 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.
13. Kyriakopoulou A, Meimeti E, Moisoglou I, Psarrou A, Provato-poulou X, Dounias G. Parental occupational exposures and risk of childhood acute leukemia. *Mater Sociomed.* 2018; 30(3): 209-214.
14. EMFs.info. Limits in the USA. Available: <https://www.emfs.info/limits/limits-usa/> [accessed 5 March 2023].
15. SAEFL. Electromog in the Environment. Bern: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL); 2005.
16. 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. *Environ Res.* 2018; 164: 467-474.
17. Brouwer M, Koeman T, van den Brandt PA, Kromhout H, Schouten LJ, Peters S, et al. Occupational exposures and Parkinson's disease mortality in a prospective Dutch cohort. *Occup Environ Med.* 2015; 72(6): 448-455.

18. Udroui I, Antoccia A, Tanzarella C, Giuliani L, Pacchierotti F, Cordelli E, et al. Genotoxicity induced by foetal and infant exposure to magnetic fields and modulation of ionising radiation effects. *PLoS One*. 2015; 10(11): e0142259.
19. Gajšek P, Ravazzani P, Grellier J, Samaras T, Bakos J, Thuróczy G. Review of studies concerning electromagnetic field (EMF) exposure assessment in Europe: low frequency fields (50 Hz-100 kHz). *Int J Environ Res Public Health*. 2016; 13(9): 875.
20. Belyaev I, Dean A, Eger H, Hubmann G, Jandrisovits R, Kern M, et al. EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses. *Rev Environ Health*. 2016; 31(3): 363-397.
21. Ministry of Environment. Environmental Impact Assessment Act, Enforcement Ordinance, No 33101, 2022. 12. 20.. Sejong: Ministry of Environment; 2022.
22. Sohrabi MR, Tarjoman T, Abadi A, Yavari P. Living near overhead high voltage transmission power lines as a risk factor for childhood acute lymphoblastic leukemia: a case-control study. *Asian Pac J Cancer Prev*. 2010; 11(2): 423-427.
23. Amoon AT, Crespi CM, Ahlbom A, Bhatnagar M, Bray I, Bunch KJ, et al. Proximity to overhead power lines and childhood leukaemia: an international pooled analysis. *Br J Cancer*. 2018; 119(3): 364-373.
24. ENTSO-E. Statistical Yearbook 2009. Brussels: Secretariat of ENT-SO-E; 2010.
25. European Communities. Background Paper: Undergrounding of Electricity Lines in Europe. Brussels: Commission of the European Communities (EC); 2003.
26. ICF Consulting. Overview of the Potential for Undergrounding the Electricity Networks in Europe. London: DG TREN/European Commission; 2003.
27. Jung JS, Jung HS, Lee KM, Lee JW, Kwon MH, Gu JH. A study of Extremely Low Frequency Magnetic-Fields emission levels from underground cables in Korea. *J Odor Indoor Environ*. 2019; 18(3): 195-202.
28. Choi S, Kim S, Bae S, Kim W, Park JH, Chung E, et al. Characterization of levels of extremely low frequency magnetic fields emitted from portable hand-held fans. *Bioelectromagnetics*. 2019; 40(8): 569-577.
29. Seomun G, Lee J, Park J. Exposure to extremely low-frequency magnetic fields and childhood cancer: a systematic review and meta-analysis. *PLoS One*. 2021; 16(5): e0251628.
30. Zhao L, Liu X, Wang C, Yan K, Lin X, Li S, et al. Magnetic fields exposure and childhood leukemia risk: a meta-analysis based on 11,699 cases and 13,194 controls. *Leuk Res*. 2014; 38(3): 269-274.
31. Schüz J. Exposure to extremely low-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer: update of the epidemiological evidence. *Prog Biophys Mol Biol*. 2011; 107(3): 339-342.
32. Bunch KJ, Swanson J, Vincent TJ, Murphy MF. Magnetic fields and childhood cancer: an epidemiological investigation of the effects of high-voltage underground cables. *J Radiol Prot*. 2015; 35(3): 695-705.
33. Pedersen C, Raaschou-Nielsen O, Rod NH, Frei P, Poulsen AH, Johansen C, et al. Distance from residence to power line and risk of childhood leukemia: a population-based case-control study in Denmark. *Cancer Causes Control*. 2014; 25(2): 171-177.
34. Kroll ME, Swanson J, Vincent TJ, Draper GJ. Childhood cancer and magnetic fields from high-voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *Br J Cancer*. 2010; 103(7): 1122-1127.
35. Abdul Rahman HI, Shah SA, Alias H, Ibrahim HM. A case-control study on the association between environmental factors and the occurrence of acute leukemia among children in Klang Valley, Malaysia. *Asian Pac J Cancer Prev*. 2008; 9(4): 649-652.
36. 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.
37. Talibov M, Olsson A, Bailey H, Erdmann F, Metayer C, Magnani C, et al. Parental occupational exposure to low-frequency magnetic fields and risk of leukaemia in the offspring: findings from the Childhood Leukaemia International Consortium (CLIC). *Occup Environ Med*. 2019; 76(10): 746-753.
38. Hug K, Grize L, Seidler A, Kaatsch P, Schüz J. Parental occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and childhood cancer: a German case-control study. *Am J Epidemiol*. 2010; 171(1): 27-35.

〈저자정보〉

박동욱(교수)