

지하철 운행 중 발생하는 객차 내부 극저주파 자기장(ELF-MF) 세기 평가

이지현^{1,3} · 강명지² · 박윤경³ · 박동욱⁴ · 최상준^{3*}

¹순천향대학교 부속 구미병원 작업환경측정, ²계명대학교 공중보건학과,

³대구가톨릭대학교 산업보건학과, ⁴한국방송통신대학교 환경보건학과

Evaluation of Intensity of Extremely Low Frequency Magnetic Fields (ELF-MF) Inside of Cabins as Generated During Subway Operation

Jihyun Lee^{1,3} · Myeongji Kang² · Yunkyung Park³ · Donguk Park⁴ · Sangjun Choi^{3*}

¹Work Environment Measurement, Gumi Hospital, SoonChunHyang University

²Department of Public Health, KeiMyung University

³Department of Occupational Health, Daegu Catholic University

⁴Department of Environment Health, Korea National Open University

ABSTRACT

Objective: This study was conducted to investigate the intensity of the extremely low frequency magnetic fields(ELF-MF) generated inside of the cabins during subway operation.

Methods: The ELF-MF intensity were investigated on 30 subway lines in Korea, including in the Greater Seoul Metropolitan Area(Seoul and Gyeonggi-do Province), Incheon, Busan, Daegu, Daejeon, and Gwangju. ELF-MF intensity was measured at 0.9 m from the floor using EMDEX II meters with a resolution of 0.01 μ T. All data were collected every three seconds and analyzed with EMCALC 2013 version 3.0B software. Basic characteristics of subway operation, including alternative current(AC) or direct current(DC), voltage level, and opening year of the line were investigated. Real-time information during measurement, such as the time of departure, moving and arrival of trains, were also recorded.

Results: The arithmetic mean(AM) and maximum(Max) intensity of ELF-MF were 0.62 μ T and 11.51 μ T, respectively. Compared by region, the ELF-MF intensity measured inside cabin were the highest in the Seoul Metropolitan Area(AM=0.80 μ T), followed by Busan(AM=0.30 μ T), Daegu(AM=0.29 μ T), Incheon(AM=0.14 μ T), Gwangju(AM=0.04 μ T) and Daejeon(AM=0.03 μ T). The average ELF-MF level measured in AC trains(AM=1.36 μ T) was also significantly higher than in DC trains(AM=0.28 μ T). In terms of the opening year of the subway, trains opened before 1990(AM=0.85 μ T) was the highest and the lowest was 2000-2009(AM=0.24 μ T).

Conclusions: The AC supply has the greatest influence on the generation of the ELF-MF intensity in subway cabins.

Key words: alternative current, ELF-MF, subway

I. 서 론


1979년 전력선 주변에 거주하는 아동들과 소아백혈병 사이의 연관성 연구(Wertheimer & Leeper, 1979)를


시작으로 극저주파 자기장(extremely low frequency magnetic field, ELF-MF)과 인체의 건강에 대한 역학 연구 사례가 보고되고 있다. Floderus et al.(1994)은 철도 산업에 종사하는 근로자들을 대상으로 환자-대조


*Corresponding author: Sangjun Choi, Tel: 053-850-3738, E-mail: junilane@gmail.com


Department of Occupational Health, Daegu Catholic University, 13-13, Hayang-ro, Gyeongsan-si, Gyeongbuk, 38430


Received: February 21, 2019, Revised: May 22, 2019, Accepted: May 28, 2019

 Jihyun Lee <https://orcid.org/0000-0002-3419-3854>

 Yunkyung Park <https://orcid.org/0000-0002-4068-3745>

 Sangjun Choi <https://orcid.org/0000-0001-8787-7216>

 Myeongji Kang <https://orcid.org/0000-0003-2948-2835>

 Donguk Park <https://orcid.org/0000-0003-3847-7392>

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.

군 연구를 수행한 결과 뇌하수체의 암, 유방암, 그리고 젊은 연령층에서의 뇌암이 일반인구에 비해 현저히 높게 나타났으며 이는 철도 근무에서의 높은 전자파 노출 때문일 것으로 추정하였다. Minder & Pfluger(2001)는 극저주파 자기장에 대한 노출이 백혈병과 뇌종양 사이에 약한 연관성이 있다고 결론지었다. 또한 전자파 노출로 인해 갑자스런 심근경색의 위험이 증가하며 (Santangelo et al., 2005), 전자파에 대한 장기 노출은 급성 심근경색 및 부정맥 사망과 관련이 있다는 보고도 있다. 이 외에도 전자파 노출이 여성에게 유방암 발생 및 위험을 증가시킨다는 역학 연구 사례도 보고되었다(Loomis et al., 1994; Labreche et al., 2003). 반면 극저주파 자기장 노출이 인체에 영향을 미치지 않는다는 연구도 있다. 전자파 노출과 남성 유방암 발생의 관계를 평가한 Pollán et al.(2001)의 연구에 의하면 전자파 노출수준이 다른 직업별로 유의한 차이가 발견되지 않았다고 한다. 50Hz 자기장의 직업적 노출과 여성 유방암의 발생을 연구한 일부 문헌에서도 그 위험도가 다소 낮다고 보고되고 있다(Kliukiene et al., 2004). 전기 관련 근로자의 자기장 노출은 동맥경화증, 만성 심장동맥성 심실환과는 연관성이 없었다고 하였다(Savitz et al., 1999). 또한 Navas-Acién et al. (2002) 연구에서는 극저주파 자기장 노출과 수막종 위험 사이에 연관성을 발견하지 못했다고 보고하였다. 이러한 선행 연구를 고려하여 국제 암 연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)는 소아 백혈병에 대한 제한된 증거를 토대로 극저주파 자기장을 Group 2B(possibly carcinogenic) '인간에게 발암 가능성이 있음'으로 분류하였다.

극저주파 자기장에 대한 노출기준은 전파법 제47조의2 전자파 인체보호기준에 명시되어 있다(MOLEG, 2017). 60 Hz의 범위에서 일반인에 대한 전자파 인체 보호기준은 $5/f$ (if $f=0.06$ kHz, $83.3 \mu\text{T}$)로 설정되어 있다. 국제 기준으로 국제 비이온화 방사 보호 위원회(International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP, 2018)는 일반 대중의 경우 $200 \mu\text{T}$, 미국 정부 산업위생 전문가 협의회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)의 TLV에서는 $60/f$ mT(if $f=60$ Hz, $1000 \mu\text{T}$)로 설정되어 있다.

극저주파 자기장에 대한 직업적 노출은 사무직이나 주부 혹은 학생들의 노출수준에 비해 약 5배에서 10배

에 이른다고 보고되고 있다(Deadman, 1996; Kim et al., 1997). 구체적으로는 열차 기관사, 전로 보수원, 재봉사, 별목업자, 용접공은 $2.0 \mu\text{T}$ 이상의 높은 자기장에 노출되었다고 보고하였다(Portier & Wolfe, 1998).

지하철은 전기를 이용해 운행되며, 우리나라에서 가장 많은 승객을 빠르게 이동시킬 수 있는 도시의 주요 대중교통 수단이다. 2017년 한 해 동안 지하철 이용객은 하루 평균 약 천만 명 정도라고 하며, 일주일에 평균 5-10회 이용하는 것으로 보고하고 있다(KORAIL, 2017). 최근 고압전류를 만지는 전기원에 대한 백혈병이 직업병으로 처음 인정되면서 전자기파에 대한 사회적인 관심은 높아졌다. 하지만 많은 사람들이 이동수단으로 지하철을 이용하고 있으며, 지하철에서 발생하는 전자기파 관련 연구 자료는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 지하철 운행 중 발생하는 극저주파 자기장의 세기와 극저주파 자기장의 세기에 영향을 미치는 관련 요인에 대해 알아보고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

지하철은 용어상 지하 구간을 이동하는 전철만을 의미할 수 있으나, 국내에서는 지하뿐만 아니라 지상 구간도 포함하고 있고, 고가로 이동하는 모노레일도 함께 지칭하고 있기 때문에 본 논문에서 지하철은 도시 및 주변 지역을 대상으로 전기 동력을 이용하는 대중교통 수단의 의미로 정의하였다.

지하철에 사용되는 전류, 전압과 지하철의 개통년도 등에 대한 기초 자료는 각 지하철을 관리하는 운영회사 홈페이지(서울교통공사, 서울시메트로9호선(주), 한국철도공사, 의정부 경전철(주), 우이신설 경전철(주), 용인 경량전철(주), 공항철도(주), 신분당선(주) 네오펀스, 경기철도(주), 인천교통공사, 부산교통공사, 부산-김해 경전철(주), 대구도시철도공사, 대전광역시 도시철도공사, 광주광역시 도시철도공사)와 철도산업정보센터를 통해 수집하였다(Table 1).

우리나라 각 지역에서 운행되고 있는 지하철을 대상으로 2018년 8월 4일부터 2018년 8월 25일까지 극저주파 자기장의 세기를 측정하였다. 서울과 경기도를 합쳐 수도권 지역으로 구분하였으며, 수도권 지역은 21개 호선 중 17개 호선으로 서울 1호선~9호선, 분당선, 용인 경전철, 공항철도, 서해선, 신분당선, 수인선, 의정부

Table 1. The basic characteristics of the subway investigated in this study

Region	Line	Section	No. of stations	Open year	Number of visitors*	Current [†]	Voltage	Type
Metropolitan area	1	Seoul station-Cheongnyangni	10	1974-08-15	174,498	DC	1500	Wide-area railroad
	1(Gyeongbu)	Seoul station-Dujeong	37	1974-08-15	259,277	AC	25000	
	1(Gyeongin)	Guro-Incheon	21	1974-08-15	173,782	AC	25000	
	1(Gyeongwon)	Cheongnyangni-Soyosan	25	1974-08-15	173,399	AC	25000	
	1(Janghang)	Cheonan-Sinchang	7	2008-12-15	6,109	AC	25000	
	2	Seongsu-Seongsu	44	1980-10-31	802,358	DC	1500	Urban railroad
	2(Seongsu Branch)	Seongsu-Sinseldong	5	1980-10-31		DC	1500	
	2(Sinjeong Branch)	Sindorim-Kkachisan	5	1992-05-22		DC	1500	
	3	Ogeum-Jichuk	34	1985-07-12	327,438	DC	1500	Urban railroad
	3(Ilsan)	Jichuk-Daehwa	11	1996-01-30	60,176	DC	1500	
	4	Danggogae-Namtaeryeong	26	1985-04-20	337,778	DC	1500	Wide-area railroad
	4(Ansan)	Geumjeong-Oido	14	1988-10-25	62,305	AC	25000	
	4(Gwacheon)	Namtaeryeong-Geumjeong	10	1993-01-15	60,540	AC	25000	
	5	Banghwa-Sangildong	44	1995-11-15	327,891	DC	1500	Urban railroad
	5(Macheon Branch)	Gangdong-Macheon	8	1996-03-30		DC	1500	
	6	Eungam-Bonghwasan	38	2000-08-07	205,011	DC	1500	Urban railroad
	7	Jangam-BupyeongguOffice	51	1996-10-11	375,777	DC	1500	Urban railroad
	8	Amsa-Moran	17	1996-11-23	103,566	DC	1500	Urban railroad
	9	SportComplex-Gaehwa	30	2009-07-24	182,188	DC	1500	Urban railroad
	Bundang	Wangsimni-Suwon	36	1994-09-01	211,921	AC	25000	Wide-area railroad
	Everline	Gheung-Jeondae-Everland	15	2013-04-26	10,087	DC	750	Light rail
	Incheon Int'l Airport Railroad Express	Seoul station-Incheon Int'l Airport Terminal 2	13	2007-03-23	81,151	AC	25000	Trunk railroad
	Seohae	Sosa-Wonsi	12	2018-06-16	-	AC	25000	Trunk railroad
Sindundang	Gangnam-Gwanggyo	13	2011-10-28	95,712	AC	25000	Wide-area railroad	
Suin	Incheon-Oido	14	2012-06-30	20,625	AC	25000	Branch railroad	
Uijeongbu Lrt	Balgok-Tapseok	15	2012-07-01	13,731	DC	750	Light rail	
Woee-Sinseol Lrt	Sinseldong-Bukhansan Ui	13	2017-09-02	8,216	DC	750	Light rail	
Incheon	1	Gyeyang-Int'l Business District	29	1999-10-06	106,267	DC	1500	Urban railroad
	2	Unyeon-Geomdan Oryu	27	2016-07-30	50,440	DC	750	Light rail
Busan	1	Dadaepo Beach-Nopo	40	1985-07-19	170,408	DC	1500	Urban railroad
	2	Jangsan-Yangsan	43	1999-06-30	122,175	DC	1500	Urban railroad
	3	Suyeong-Daejeo	17	2005-11-28	34,714	DC	1500	Urban railroad
	4	Minam-Anpyeong	14	2011-03-30	11,553	DC	750	Light rail
	Busan-Gimhae Lrt	Sasang-Kaya Univ	21	2011-09-16	18,854	DC	750	Light rail
Donghae	Bujeon-Ilgwang	14	2016-12-30	8,789	AC	25000	Wide-area railroad	
Daegu	1	Seolhwa-Myeonggok-Ansim	32	1997-11-26	72,684	DC	1500	Urban railroad
	2	Munyang-Yeungnam Univ	29	2005-10-18	63,650	DC	1500	Urban railroad
	3	Chilgok Kyungpook Nat'l Univ. Medical center-Yongji	30	2015-04-23	27,015	DC	1500	Monorail
Daejeon	1	Panam-Banseok	22	2006-03-16	39,702	DC	1500	Urban railroad
Gwangju	1	Nokdong-Pyeongdong	20	2004-04-28	18,709	DC	1500	Urban railroad

* The number of passengers is based on the Korea Railroad Corporation's 2017 Railroad Statistical Yearbook, and the unit is thousand persons/year.

† AC: alternative current, DC: direct current

경전철, 우이신설 경전철을 대상으로 하였다. 수도권 이외의 지역은 모두 광역시에서 운영되는 지하철을 대상으로 하였다. 인천광역시는 인천 1호선과 2호선으로 2개 호선, 부산광역시는 부산 1호선~4호선, 부산-김해 경전철, 동해선으로 6개 호선, 대구광역시는 대구 1호선~3호선으로 3개 호선, 대전광역시와 광주광역시는 각각 1개 호선을 대상으로 측정하였다.

2. 측정 방법

극저주파 자기장 측정은 EMDEX II(Enertech Consultants Inc. Patterson, CA, USA)를 사용하였다. EMDEX II는 자체 센서를 통해 자기장의 세 직교 벡터 성분(X, Y, Z축)을 측정할 수 있도록 개발된 측정기이다. 이 측정기는 실시간으로 자료를 기록하며, 측정 가능 범위는 0.01~300 μ T, 주파수 대역은 광대역(broadband) 40~800 Hz, 분해능(resolution) 0.01 μ T로 모니터링 할 수 있다. 자기장의 측정 단위로 Tesla(T) 또는 Gauss(G)가 있으나, 국제단위계에서 자기장의 단위는 Tesla(T)를 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 극저주파 자기장 단위로 micro Tesla(μ T)를 사용하였다. 전국 지하철을 대상으로 극저주파 자기장 세기의 측정을 실시하기 전 ANSI/IEEE 교정 절차에 따라 정기적으로 교정하였다.

전국 지하철 호선에 대한 측정은 각 호선의 전체 구간 중 첫 번째 역에서부터 시작하였다. 호선별로 자기장 측정을 실시한 차량은 변전소에서 공급된 전력을 받는 열차로써 열차 하부에 모터(motor)가 연결되었거나, 팬터그래프(pantograph)가 연결된 것으로 선정하였다(Figure 1-a). 측정 위치는 Figure 1-b와 같이 차량 내부에 배치된 좌석 중 중앙 좌석의 한 지점으로 좌석에 앉았을 때 머리 위치(바닥으로부터 0.9 m)에서 3초

간격으로 측정하였다. 극저주파 자기장이 역사별, 열차가 이동 및 정차할 때 발생하는 차이를 확인하고자 극저주파 자기장 측정을 실시하는 동안 각 역 구간마다 출발, 이동, 도착하는 시간을 기록하였다.

3. 자료 처리 및 통계 분석

EMCALC 2013(Enertech Consultants Inc. Patterson, CA, USA)을 이용해 EMDEX II에서 측정된 데이터를 처리하였다. 극저주파 자기장의 데이터는 Kolmogorov-Smirnov test를 이용하여 정규성 검정을 하였으나, 유의 확률이 0.001 미만으로 정규분포(normal distribution)를 따르지 않았다. 따라서 다운받은 데이터들은 대수 변환을 하였으며 산술평균(arithmetic mean, AM), 표준편차(standard deviation, SD), 기하평균(geometric mean, GM), 기하표준편차(geometric standard deviation, GSD), 사분위 범위(interquartile range, IQR), 범위(range)로 요약하였다. 전체 데이터 결과 값 중 우이신설 경전철(17.3%), 인천 2호선(2.7%), 공항철도(0.5%), 대구 3호선(3%), 광주(13.6%)의 일부 구간은 제로(0)로 나타나서 측정기의 검출한계 값인 0.01 μ T의 1/2 값으로 적용하여 자료 분석을 하였다(Hornung & Reed, 1990; Hewett, 2006).

측정 위치로부터 객차 운행상태, 공급전기 형태, 개통년도에 따른 극저주파 자기장 세기의 비교는 일원분류 분산분석(one-way ANOVA), 이원분류 분산분석(two-way ANOVA)를 사용하여 분석하였다. 극저주파 자기장에 영향을 주는 요인을 알아보기 위해 다중회귀 분석(multiple regression analysis)의 후진제거법(backward elimination)을 이용하였으며, 모든 데이터 분석은 Microsoft Excel 2016(Microsoft corporation, Redmond, WA, USA)과 PASW statistics 20(IBM SPSS, USA) 프로그램을 이용하였다.

III. 결 과

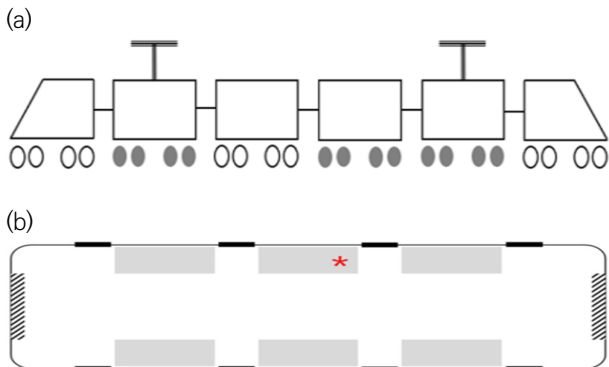


Figure 1. Diagram of subway cabins (a) and ELF-MF measurement position (b)

Table 2은 극저주파 자기장 세기가 높은 호선들에 대해 순서를 매겼으며, 극저주파 자기장 세기에 영향이 높은 요인들이 무엇인지 쉽게 볼 수 있도록 요약하여 표로 제시하였다. 사용되는 전류가 교류이고, 전압은 25,000 V, 2000년 이전에 개통된 지하철에서 극저주파 자기장이 높게 발생된다는 것을 알 수 있었다.

Table 2. Comparison of extremely low frequency magnetic field intensity measured in subway cabins by region, line number, current type, voltage level and open year

Region	Line	AM*, μT	Max†, μT	Current‡	Voltage§	Open year
Metropolitan area	4(Ansan)	2.69	11.51	▲	■	●
Metropolitan area	Sinbundang	2.58	9.35	▲	■	○
Metropolitan area	4(Gwacheon)	2.05	11.38	▲	■	◐
Metropolitan area	5(Macheon Branch)	1.57	2.21	△	□	◐
Metropolitan area	Bundang	1.57	11.21	▲	■	◐
Metropolitan area	1(Gyeongbu)	1.47	8.51	▲	■	●
Metropolitan area	1(Gyeongwon)	1.31	6.29	▲	■	●
Metropolitan area	1(Gyeongin)	1.12	6.68	▲	■	●
Metropolitan area	Suin	1.09	4.64	▲	■	○
Metropolitan area	Seohae	1.05	3.92	▲	■	○
Metropolitan area	8	1	5.79	△	□	◐
Busan	Donghae	0.97	4.81	▲	■	○
Metropolitan area	1(Janghang)	0.93	5.12	▲	■	◎
Metropolitan area	Everline	0.47	2.02	△	□	○
Metropolitan area	7	0.43	8.24	△	□	◐
Daegu	1	0.43	1.27	△	□	◐
Daegu	2	0.39	1.85	△	□	◎
Metropolitan area	5	0.37	1.67	△	□	◐
Metropolitan area	3	0.35	1.42	△	□	●
Busan	3	0.35	1.07	△	□	◎
Metropolitan area	4	0.33	1.39	△	□	●
Metropolitan area	2	0.28	2.99	△	□	●
Metropolitan area	3(Ilsan)	0.27	0.93	△	□	◐
Metropolitan area	1	0.25	0.93	△	□	●
Metropolitan area	Uijeongbu Lrt	0.25	0.83	△	□	○
Busan	2	0.24	1.04	△	□	◐
Incheon	1	0.23	2.09	△	□	◐
Metropolitan area	6	0.22	1.10	△	□	◎
Busan	1	0.2	1.14	△	□	●
Metropolitan area	9	0.19	1.29	△	□	◎
Metropolitan area	Incheon international airport railroad express	0.11	0.68	▲	■	◎
Busan	4	0.1	0.90	△	□	○
Metropolitan area	2(Sinjeong Branch)	0.07	1.1	△	□	◐
Metropolitan area	2(Seongsu Branch)	0.05	0.37	△	□	●
Incheon	2	0.04	0.43	△	□	○
Gwangju	1	0.04	0.23	△	□	◎
Metropolitan area	Woee-Sinseol Lrt	0.03	0.15	△	□	○
Busan	Busan-Gimhae Lrt	0.03	0.48	△	□	○
Daejeon	1	0.03	0.10	△	□	◎
Daegu	3	0.02	0.19	△	□	○

* AM; arithmetic mean, † Max; maximum, ‡ ▲; alternative current, △; direct current, § □; 750V, ■; 1500V, ■; 25000V, || ●; <1990, ◐; 1990-1999, ◎; 2000-2009, ○; ≥2010

1. 지하철 운행 지역에 따른 극저주파 자기장 세기 분포

지하철이 운행되는 수도권(서울, 경기도), 인천, 부산, 대구, 대전, 광주로 그룹을 나눠 극저주파 자기장 세기를 비교하였다. 6개 지역의 지하철 객차에서 측정된 평균 극저주파 자기장 세기는 Fig. 2와 같이 수도권 지역이 0.80 μT 로 가장 높았고, 부산 0.30 μT , 대구 0.29 μT , 인천 0.14 μT , 광주 0.04 μT , 대전 0.03 μT 로 나타났으며, 지역별 유의한 차이를 보였다($p < 0.001$).

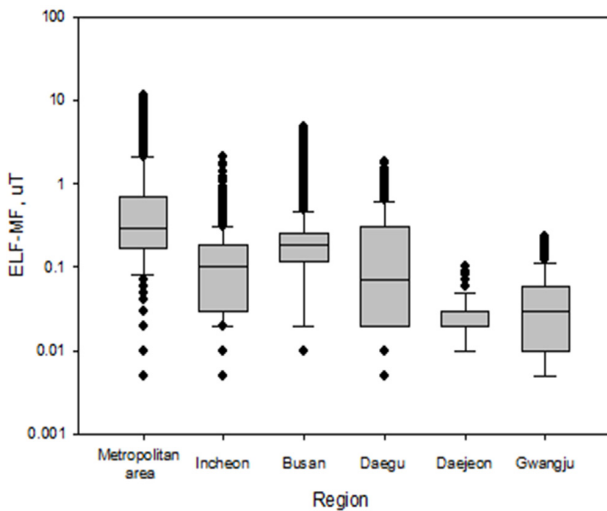


Figure 2. The distribution of ELF-MF intensity by region

2. 지하철 운행 상태에 따른 극저주파 자기장 세기 비교

30개 호선을 대상으로 측정 위치에 따른 극저주파 자기장 세기를 열차의 운행상태(출발, 이동, 도착)로 구분하여 Table 3에 나타내었다. 기록된 총 데이터의 3/4에 해당하는 이동의 평균 극저주파 자기장 세기는 0.73 μT 로 가장 높았다. 두 번째로 데이터가 많은 도착의 경우 0.27 μT 였다. 출발의 경우 기록된 데이터 수가 가장 적었지만 평균 극저주파 자기장 세기는 도착보다 높았다(0.34 μT). 열차의 운행상태에 따른 극저주파 자기장 세기는 이동하는 동안에 발생한 세기가 출발, 도착에 비해 유의하게 높았다($p < 0.001$).

3. 공급전기 형태에 따른 극저주파 자기장 세기 비교

지하철에서 사용되는 전류 형식은 교류(alternative current, AC)와 직류(direct current, DC)가 있으며 전류에 따라서 직류에는 750 V(9.9%)와 1,500 V (58.9%) 전압의 전기가 공급되고 교류에는 25,000 V (31.2%) 전압의 전기가 공급된다. Table 3는 지하철에 공급되는 전기 형태에 따른 열차 운행상태별 극저주파 자기장 세기를 나타내었다. 교류가 공급되는 지하철(교류 지하철)에서 측정된 자기장의 강도($AM=1.36 \mu\text{T}$, $Max=11.51 \mu\text{T}$)는 직류가 공급되는 지하철(직류 지하철)에서 측정된 것($AM=0.28 \mu\text{T}$, $Max=8.24 \mu\text{T}$)에 비해 통계적으로 유의

Table 3. Comparison of extremely low frequency magnetic field intensity by operation status and current type of subway

Situations	Current	Number of record	ELF-MF, μT			p-value*
			AM(SD)	GM(GSD)	Max	
Departure	AC	202	0.76(0.73)	0.51(2.67)	4.17	<0.001
	DC	686	0.21(0.36)	0.11(3.36)	3.10	
	Total	888	0.34(0.52)	0.15(3.78)	4.17	
Movement	AC	9664	1.55(1.66)	0.79(3.73)	11.51	<0.001
	DC	19635	0.32(0.39)	0.19(3.06)	8.24	
	Total	29299	0.73(1.16)	0.31(3.90)	11.51	
Arrival	AC	2288	0.63(0.66)	0.40(2.75)	5.02	<0.001
	DC	6412	0.15(0.14)	0.10(2.84)	1.59	
	Total	8700	0.27(0.42)	0.14(3.34)	5.02	
Total†	AC	12154	1.36(1.56)	0.69(3.62)	11.51	<0.001
	DC	26733	0.28(0.35)	0.16(3.14)	8.24	
	Total	38887	0.62(1.05)	0.25(3.92)	11.51	

* Owo-way ANOVA

† Two-way ANOVA

AC; alternative current, DC; direct current, AM; arithmetic mean, SD; standard deviation, GM; geometric mean, GSD; geometric standard deviation, Max; maximum

하게 높은 것으로 나타났다($p < 0.001$). 교류와 직류에서 모두 이동일 때 극저주파 자기장 세기가 가장 높았고, 도착일 때 가장 낮았으며 이는 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.001$).

4. 개통년도에 따른 극저주파 자기장 세기 비교

지하철은 1974년에 처음으로 개통된 이래 현재까지 새로운 라인들이 증설되고 있다. 개통 시기에 따라

1990년 이전, 1990년에서 1999년까지, 2000년에서 2009년까지, 2010년에서 2018년 현재까지 4개의 그룹으로 나누어 각 그룹마다 발생하는 극저주파 자기장 세기를 비교하였다(Table 4). 1990년 이전에 개통된 호선은 전체 중 약 30%를 차지하며, 개통년도에 따른 극저주파 자기장 세기는 1990년 이전에 개통된 호선에서 발생한 세기($0.85 \mu\text{T}$)가 1990년~1999년($0.65 \mu\text{T}$), 2000년~2009년($0.24 \mu\text{T}$), 2010년 이후에 개통된

Table 4. Comparison of extremely low frequency magnetic field intensity by open year and operation status of subway

Situations	Open year	Number of record	Intermediate point, μT			p-value*
			AM(SD)	GM(GSD)	IQR	
Departure	<1990	247	0.48(0.61)	0.31(2.42)	0.32	<0.001
	1990-1999	297	0.43(0.61)	0.25(2.53)	0.16	
	2000-2009	167	0.11(0.10)	0.07(3.34)	0.14	
	≥ 2010	177	0.19(0.34)	0.06(4.72)	0.26	
Movement	<1990	8963	0.98(1.33)	0.51(2.98)	0.80	<0.001
	1990-1999	8628	0.77(1.12)	0.44(2.61)	0.52	
	2000-2009	5967	0.28(0.40)	0.15(3.24)	0.28	
	≥ 2010	5741	0.75(1.31)	0.17(6.17)	0.75	
Arrival	<1990	2623	0.44(0.60)	0.28(2.33)	0.25	<0.001
	1990-1999	2646	0.30(0.35)	0.21(2.16)	0.12	
	2000-2009	1772	0.11(0.09)	0.07(2.85)	0.10	
	≥ 2010	1659	0.13(0.22)	0.05(3.98)	0.13	
Total†	<1990	11833	0.85(1.22)	0.44(2.91)	0.61	<0.001
	1990-1999	11571	0.65(1.01)	0.37(2.64)	0.44	
	2000-2009	7906	0.24(0.36)	0.13(3.28)	0.22	
	≥ 2010	7577	0.60(1.18)	0.13(6.07)	0.46	

* Owo-way ANOVA

† Two-way ANOVA

AM; arithmetic mean, SD; standard deviation, GM; geometric mean, GSD; geometric standard deviation, IQR; interquartile range

Table 5. Factors affecting extremely low frequency magnetic field intensity measured in subway cabins

Independent variable*	Non standardized coefficient (B)	Standard error	Standardized coefficient (β)	P-value	VIF†
(Constant)	0.054	0.012			
Metropolitan area	0.108	0.011	0.048	<0.001	1.256
Operation status(move)	0.379	0.011	0.156	<0.001	1.004
Open year(≥ 2000)	-0.275	0.010	-0.129	<0.001	1.073
Alternative current	1.009	0.011	0.447	<0.001	1.182

* Reference: Metropolitan area; other region, Operation status; departure or arrival, Open year;<2000, Alternative current; direct current

† VIF; variance inflation factor

호선(0.60 μT)에 비해 유의하게 높았다($p < 0.001$).

5. 극저주파 자기장에 영향을 주는 요인에 대한 다중회귀 분석 결과

극저주파 자기장에 영향을 미치는 요인이 무엇인지 검증하기 위해 지하철 운행 지역, 운행 상태, 개통년도, 전류 공급 형태를 독립변수로 하여 다중회귀분석을 실시했다(Table 5). 분석결과 수도권 지역($\beta = 0.048$), 열차가 이동 중일 때($\beta = 0.156$) 그리고 교류 전류가 공급될 때($\beta = 0.447$) 극저주파 자기장 세기가 유의하게 증가하였다($p < 0.001$). 지하철이 2000년 이후에 개통된 경우($\beta = -0.129$) 극저주파 자기장 세기는 유의하게 감소하는 것으로 나타났다($p < 0.001$).

IV. 고 찰

1974년 8월 15일 서울 1호선을 시작으로 2018년 6월 16일 서해선까지 우리나라에는 총 34개 호선의 지하철이 있다. 본 연구에서는 경의중앙선과 경춘선, 경강선, 인천공항 자기부상철도를 제외한 나머지 30개 호선을 연구대상으로 하여 극저주파 자기장의 세기를 평가하였다. 평균 극저주파 자기장 세기를 지역별로 비교하였을 때 수도권>부산>대구>인천>광주>대전 순이었으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.001$).

Jalilian et al.(2017)은 이란의 테헤란 지하철을 대상으로 한 연구에서 직류와 교류에 따른 운행 상태별 평균 극저주파 자기장은 가속(직류=0.46 μT , 교류=0.43 μT), 운행(직류=0.27 μT , 교류=0.66 μT), 감속(직류=0.38 μT , 교류=0.47 μT)로 단계별로 다르게 측정되었다. 본 연구 결과는 출발(직류=0.21 μT , 교류=0.76 μT), 이동(직류=0.32 μT , 교류=1.55 μT), 도착(직류=0.15 μT , 교류=0.63 μT)으로 이동 상태에서 가장 높게 나타났다. Jalilian et al.(2017)의 연구와 본 연구는 운행 상태에 대한 분류가 동일하지 않지만 공통적인 점은 운행 상태별로 자기장의 강도가 다른 패턴을 보이는 점과 교류 지하철에서의 자기장 발생 수준이 직류보다 높게 나타나고 있는 점이다. 본 연구에서 자기장 측정을 위해 사용한 EMDEX II는 주파수 범위가 40~800 Hz의 극저주파 영역의 자기장만 측정할 수 있기 때문에 일반적으로 직류 전원(주파수=0 Hz)에서 발생하는 정자기장(static magnetic field)은 측정할 수 없다. 그러나 직류 전원을 사용하는 지하철의 경우 직류

전원 자체에서는 극저주파 자기장이 발생하지 않지만, 전력이 전달되어 전동 모터가 가동될 경우 정자기장 외에 극저주파 영역의 자기장이 발생되기 때문에 직류 지하철 내부에서도 EMDEX II로 극저주파 자기장이 측정될 수 있다. Bowman et al.(2000)의 연구에서도 직류 건전지를 사용한 지게차(2.2 μT , 중심 주파수 168, 156, 324 Hz), 2마력 모터(1.4 μT , 중심 주파수 120, 240, 360 Hz)에서 여러 중심 주파수의 극저주파 자기장이 발생한다는 것이 보고되었다. Park et al. (2018)은 직류 건전지를 이용한 손 선풍기 13종에 대한 극저주파 자기장 발생 수준을 측정한 결과 선풍기로부터 5 cm 떨어진 지점에서 최대 50.6 μT 수준이 발생한다고 보고하였다. Park et al.(2018)은 또한 과학기술부에서도 직류 건전지를 사용하는 손 선풍기 45종에서 중심 주파수가 54~284 kHz인 극저주파 영역의 자기장이 발생하는 것을 확인했다고 보고하고 있다. 따라서 본 연구의 결과 직류 전원을 이용하는 지하철의 경우에도 모터에 전원이 공급되어 가동될 경우 극저주파 영역의 자기장이 직류 전원 모터보다 낮지만 발생함을 보여주고 있다.

극저주파 자기장에 영향을 미치는 요인을 알아보고자 다중회귀분석을 실시한 결과 수도권 지역에서 운행되는 경우, 2000년 이전에 개통된 경우, 지하철이 이동하는 동안, 그리고 교류 전류가 공급되는 경우에 극저주파 자기장의 세기가 유의하게 증가하는 것으로 나타났다($p < 0.001$). 특히 교류 전류가 공급되는 경우($\beta = 0.447$) 극저주파 자기장 세기에 가장 큰 양(+)의 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 독립변수들 간에 강한 상관관계가 존재하는지 검증하기 위해 분산팽창지수(variance inflation factor, VIF)값을 검증하였다. VIF값이 10 미만으로 작게 나타나 다중공선성 문제는 없는 것으로 판단하였다.

전국 지하철을 대상으로 극저주파 자기장 세기가 가장 높은 peak 값이 측정된 서울 4호선(Ansan, 11.51 μT)은 일반인에 대한 우리나라 인체보호기준(83.3 μT)과 비교하였을 때 약 1/7배 수준으로 기준을 초과하지는 않았다. 이는 급성노출과 급성 건강영향을 고려해서 만든 인체보호기준에 비해 낮지만, 반도체 제조업의 주요 공정라인의 설비(30 cm, 0.4~34 μT)와는 비슷하거나 더 높게 발생된다는 것을 알 수 있었다(Chung et al., 2012).

본 연구는 2018년 8월 시점으로 전국에서 운행되는

대부분의 지하철을 대상으로 이동 상태에 따라 지하철 객차에서 발생하는 극저주파 자기장의 세기를 측정하였기 때문에 국내 지하철 객차 내에서 운행상태에 따른 극저주파 자기장 세기를 파악할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있다고 기대한다. 본 연구 결과는 지하철을 이용하는 시민들의 지하철 노선별 이용 시간을 활용하여 개인 노출량 추정에도 기초 자료로 활용 할 수 있으며, 특히 직업적으로 장시간 지하철 운전을 해야 하는 지하철 승무원의 직업적 노출을 추정하는데도 활용될 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 연구는 전국을 대상으로 지하철 운행 중 발생하는 객차 내부의 극저주파 자기장 세기를 평가하였다. 각 지역별 평균 극저주파 자기장 세기는 수도권 지역이 0.80 μ T로 가장 높았고, 부산 0.30 μ T, 대구 0.29 μ T, 인천 0.14 μ T, 광주 0.04 μ T, 대전 0.03 μ T 순이었다. 지하철 객차 내부의 극저주파 자기장 세기는 수도권 지역에서 운행되는 경우, 2000년 이전에 개통된 경우, 열차가 이동 중, 그리고 교류 전류가 공급되는 열차의 경우 증가되었으며, 특히 교류 전류 공급이 극저주파 자기장 세기 증가에 가장 큰 영향을 나타내었다.

References

- Belyaev I, Dean A, Eger H, Hubmann G, Jandrisovits R, Kern M, Oberfeld G. EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses. *Rev Environ Health*. 2016 Sep 1;31(3):363-97 (<https://doi.org/10.1515/reveh-2016-0011>)
- Bowman JD, Methner MM. Hazard surveillance for industrial magnetic fields: II. Field characteristics from waveform measurements. *Ann Work Expo Health*. 2000;44(8):615-33
- Chung EK, Kim KB, Chung KJ, Lee IS, You KH, Park JS. Occupational exposure of semiconductor workers to ELF magnetic fields. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*, 2012, 22(1):42-51.
- Deadman JE, Armstrong BG, Theriault G. Exposure to 60-Hz magnetic and electric fields at a Canadian electric utility. *Scand J Work Environ Health*. 1996 Dec;22(6):415-24
- Deadman JE, Infante-Rivard C. Individual estimation of exposures to extremely low frequency magnetic fields in jobs commonly held by women. *Am J Epidemiol*. 2002 Feb 15;155(4):368-78(<https://doi.org/10.1093/aje/155.4.368>)
- Floderus B, Törnqvist S, Stenlund C. Incidence of selected cancers in Swedish railway workers, 1961-79. *Cancer Causes Control*. 1994 Mar;5(2):189-94
- Halgamuge MN, Abeyrathne CD, Mendis P. Measurement and analysis of electromagnetic fields from trams, trains and hybrid cars. *Radiat Prot Dosimetry*. 2010 Oct;141(3):255-68(<https://doi.org/10.1093/rpd/ncq168>)
- Havas M, Shum S, Dhalla R. Passenger exposure to magnetic fields on go trains and on buses, streetcars, and subways run by the Toronto transit commission, Toronto, Canada. *Biological Effects of EMFs. 3rd International Workshop, Kos, Greece; 2004*, p. 4-8
- Hewett P. Analysis of censored data. In: *A strategy for assessing and managing occupational exposures*, Third edition. Fairfax, VA, AIHA press. 2006, p. 415-21
- Hornung R, Reed L. Estimation of average concentration in the presence of nondetectable values. *Appl Occup Environ Hyg*. 1990 Jan;5(1):46-51(<https://doi.org/10.1080/1047322X.1990.10389587>)
- International Agency for Research on Cancer. Static and extremely low frequency electric and magnetic fields. *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 2002, 80.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys*. 1998 Apr; 74(4):494-522
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP statement related to the use of security and similar devices utilizing electromagnetic fields. *Health Phys*. 2004 Aug;87(2):187-96
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP statement on the "guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields(up to 300 GHz)". *Health Phys*. 2009 Sep;97(3):257-8(<https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181aff9db>)
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys*. 2010 Dec;99(6):818-36(<https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86>)
- Jalilian H, Najafi K, Monazzam MR, Khosravi Y, Jamali J.

- Occupational exposure of train drivers to static and extremely low frequency magnetic fields in Tehran subway. *Jundishapur Journal of Health Sciences* 2017;9(4)(<https://doi.org/10.5812/jjhs.14329>)
- Jang SK, Cho YS, Lee SJ, Yoo SW, Jung KM, Lim JH. A Survey on the EMF Levels of Study and Electric Appliances in Korea. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2005;15(1):71-81
- Ju MN, Yang KH, Myung SH. Survey on the Personal Magnetic Field Exposure of Sample Koreans from Living Environment. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* 2004;53(2):97-102
- Kim YS, Kim SY, Park JY, Choi WU. Measurement and Personal Exposure Assessment of Extremely Low Frequency(ELF) Electromagnetic fields(EMF). *Kor J Env Hlth Soc* 1997;23(1):55-61
- Kliukiene J, Tynes T, Andersen A. Residential and occupational exposures to 50-Hz magnetic fields and breast cancer in women: a population-based study. *Am J Epidemiol*. 2004 May 1;159(9):852-61 (<https://doi.org/10.1093/aje/kwh116>)
- Korea environmental industry & technology institute. Electromagnetic wave health effect research trend, 2014
- Korea Railroad Corporation. Railway statistics annual report(II), 2017
- Labreche F, Goldberg MS, Valois MF, Nadon L, Richardson L, Lakhani R, Latreille B. Occupational exposures to extremely low frequency magnetic fields and postmenopausal breast cancer. *Am J Ind Med*. 2003 Dec;44(6):643-52(<https://doi.org/10.1002/ajim.10264>)
- Lee SK, Park JS, Ahn JH, Sin MY. A Study on Work Relevance Health Impairment of Live Workers. Occupational Safety and Health Research Institute, 2017
- Loomis DP, Savitz DA, Ananth CV. Breast cancer mortality among female electrical workers in the United States. *J Natl Cancer Inst*. 1994 Jun 15;86(12):921-5
- Navas-Acién A, Pollán M, Gustavsson P, Floderus B, Plato N, Dosemeci M. Interactive effect of chemical substances and occupational electromagnetic field exposure on the risk of gliomas and meningiomas in Swedish men. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*. 2002 Dec;11(12):1678-83
- Minder CE, Pfluger DH. Leukemia, brain tumors, and exposure to extremely low frequency electromagnetic fields in Swiss railway employees. *Am J Epidemiol*. 2001 May 1;153(9):825-35 Ministry of Government Legislation. RADIO WAVES ACT(<https://doi.org/10.1093/aje/153.9.825>)
- Park DU, Yi SG, Kim SY, Bae SY, Choi SJ, Kim W, Min SH, Park JH, Ahn JJ. Discussion of exposure evaluation associated with extremely low frequency-magnetic field in the case of portable hand-held fans. *J Environ Health Sci*. 2018, 44(5):480-490.
- Park KH, Ahn YH, Kim TJ. Health Status of Electric Utility Workers Exposed to Extremely Low Frequency Electromagnetic field(ELF-EMF). *Korean J Clin Lab Sci* 2005;37(3):220-227
- Pollán M, Gustavsson P, Floderus B. Breast cancer, occupation, and exposure to electromagnetic fields among Swedish men. *Am J Ind Med*. 2001 Mar; 39(3):276-85([https://doi.org/10.1002/1097-0274\(200103\)39:3<276::AID-AJIM1015>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1097-0274(200103)39:3<276::AID-AJIM1015>3.0.CO;2-B))
- Portier CJ, Wolfe MS. Assessment of health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. NIH publication, 1998;98:3981
- Röösli M, Egger M, Pfluger D, Minder C. Cardiovascular mortality and exposure to extremely low frequency magnetic fields: a cohort study of Swiss railway workers. *Environ Health*. 2008 Jul 1;7:35(<https://doi.org/10.1186/1476-069X-7-35>)
- Santangelo L, Di Grazia M, Liotti F, De Maria E, Calabro R, Sannolo N. Magnetic field exposure and arrhythmic risk: evaluation in railway drivers. *Int Arch Occup Environ Health*. 2005 May;78(4):337-41(<https://doi.org/10.1007/s00420-004-0541-2>)
- Savitz DA, Liao D, Sastre A, Kleckner RC, Kavet R. Magnetic field exposure and cardiovascular disease mortality among electric utility workers. *Am J Epidemiol*. 1999 Jan 15;149(2):135-42(<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a009779>)
- World Health Organization. Environmental Health Criteria 238: Extremely Low Frequency Fields, 2007

<저자정보>

이지현(대학원생), 강명지(대학생), 박윤경(대학원생), 박동욱(교수), 최상준(교수)