

## 변전소 근무자의 극저주파 자계노출량 분석과 저감대책

민석원  
순천향대학교 전기공학과

### Analysis on The ELF Magnetic Fields Exposures of Worker in The Electrical Substation and Reduction Countermeasures

Suk-Won Min  
Division of Electrical Engineering, Soonchunhyang University

**요약** 극저주파 자계 노출과 전기 직업인의 건강영향에 대해서는 아직도 불안감이 있다. 국제비전리방사선방호위원회에서는 1998년과 2010년에 인체 보호기준을 제안하였다. 2010년 기준의 주된 개정 사항은 건강영향을 평가하는 기본 역제 물리량을 유도 전류밀도(1998년 기준)에서 인체 내부 유도전계로 바꾼 것이다. 이를 바탕으로 유럽연합에서는 직업인 전자계 노출 관련 건강과 안전 최소 기준 법안을 2013년 6월 발표하였다. 본 논문에서는 우리나라 변전소 근무자가 노출되는 자계 환경을 변전소 종류, 전압, 설비 별로 조사하였다. 또한 자계 노출 저감 대책을 수립하기 위해 중성점 접지 리액터를 예로 철, 규소강의 자성재의 특성을 인체 유도전계 관점에서 경계 요소법을 적용하여 검토하였다. 조사 결과 154 kV, 345 kV 모두 옥내 GIS가 옥외 철구형보다 밀집된 공간에 전력 설비를 배치하여 높은 자계값을 보였다. 지하 전력구의 경우는 순찰로가 케이블에 근접하여 가장 높은 자계값을 보였다. 중성점 접지 리액터 자계 차폐재로는 철은 인체 내부기관에 유도되는 전계를 감소시킬 수 있으나 규소강은 유도전계가 매우 커지는 현상을 보였다.

**Abstract** There are ongoing concerns on the possible negative health effects of the exposure to ELF (Extra Low Frequency) magnetic fields of human beings. In this regard, the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection proposed human protection guidelines in the years 1998 and 2010. One of the main revisions of the 2010 guideline is to change the basic restriction quantity that evaluates health effects from the induced current density (a value from 1998) as compared to the induced electric field inside the human body. In this paper, the magnetic field environment to which the Korean substation workers are exposed was investigated by substation type, voltage, and equipment. In addition, to establish measures to reduce exposure to magnetic fields, the properties of magnetic materials iron and silicon steel were reviewed by applying the boundary element method from the point of view of the induced electric field. As a result of the investigation, both 154 kV and 345 kV indoor GIS showed high magnetic field values when arranging power facilities in a space where indoor GIS was denser than outdoor steel type. In the case of the underground tunnel, the patrol route was close to the cable and showed the highest magnetic field value. As shielding material of neutral ground reactor, iron can reduce the electric field induced in the internal organs of the human body, but silicon steel shows a phenomenon that the induced electric field becomes very large.

**Keywords** : ELF Magnetic Fields Exposure, Worker, Substation, Magnetic Fields Reduction, Magnetic Material

---

본 논문은 2013년도 순천향대학교 교수 연구년제에 의하여 연구하였음.

\*Corresponding Author : Suk-Won Min(Soonchunhyang Univ.)

email: swonmin@sch.ac.kr

Received July 8, 2021

Accepted October 1, 2021

Revised August 2, 2021

Published October 31, 2021

## 1. 서론

극저주파 자계노출과 전기직업인의 암 발생 간의 상관 관계를 밝히기 위한 많은 역학연구가 수행되었어도[1-3] 연구결과들이 일관성이 부족하여 자계의 건강영향에 대해 불안감이 있다[4]. 관련하여 국제비전리방사선방호위원회(ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)에서는 1998년과 2010년에 인체보호기준을 제안하였다[5,6]. 2010년 기준의 주된 개정사항은 건강영향을 평가하는 기본 역제 물리량을 유도전류밀도(1998년 기준)에서 인체 내부 유도전계로 바꾼 것이다. 25 Hz에서 400 Hz 범위에서 직업인 노출치는 머리(뇌와 안구)의 중추신경계 조직에 유도되는 전계가  $2 \times 10^{-3} f$  V/m (여기서  $f$ 는 주파수) 이하 이어야 하고 400 Hz에서 3 kHz 범위에서는 인체 모든 부위에서 0.8 V/m 이하 이어야 한다. 이를 바탕으로 또한 유럽연합에서는 참고문헌 [7]의 직업인 전자계 노출 관련 건강과 안전 최소 기준 법안을 2013년 6월 발표하였다.

우리나라에서는 154 kV 변압기의 큰 고장전류로 인한 소손사고를 감소시키기 위해 중성점 접지 리액터(NGR: Neutral Ground Reactor)를 설치하고 있으나 정상상태에서 부하 불평형으로 인해 리액터 주변에는 고조파 성분의 자계들이 발생한다. 본 저자는 2010년에 리액터 주변 자계들에 노출된 근무자에 유도되는 전류밀도를 해석하여, 1998년 기준을 만족하지 못할 수 있음을 확인하였다[8]. 또한, 본 저자는 참고문헌 [9]의 연구를 수행하여, 중성점 접지 리액터에서 발생하는 180Hz 자계와 540Hz 자계에 노출된 근무자 유도전계가 2010년 개정된 기준을 충족함을 알았다.

본 논문에서는 우리나라의 여러 상황을 검토하기 위해 변전소 근무자가 노출되는 자계환경을 변전소 종류, 전압, 설비 별로 조사 하였다. 또한 자계노출 저감대책을 수립하기 위해 중성점 접지 리액터를 예로 자성재의 특성을 인체유도전계 관점에서 경계요소법을 적용하여 검토하였다.

## 2. 변전소 자계환경

### 2.1 변전소 종류 별 자계환경

변전소 근무자가 노출되는 자계환경을 Fig. 1과 같은

미국 Enertec사의 Emdex II, Emdex lite, Linda (Linear data acquisition system) 측정기로 근무자가 통상 접근하는 경로를 따라 Fig. 2와 같이 2019년 3월부터 10월까지 측정하였다. 변전소는 전압별(765/345/154 kV), 형태별(옥내/옥외/철구/GIS/지하 전력구)로 구분하였다.

Fig. 3은 154 kV 옥내 GIS 충남 아산의 장재리 변전소로 지상과 지하로 구분된 무인 변전소의 자계분포 측정값이다. 402개소 측정치의 평균치는 78.64 mG, 최대치는 1,210 mG 였다. Fig. 4는 154 kV 옥외 철구형 천안 성거 변전소로 459개소 측정치의 평균치는 53.51 mG, 최대치는 318 mG 였다. Fig. 5는 345 kV 옥외 GIS 아산 변전소로 1,179개소 측정치의 평균치는 66.88 mG, 최대치는 610 mG 였다. Fig. 6은 345 kV 옥외 철구형 신옥천 변전소로 1,544개소 측정치의 평균치는 48.44 mG, 최대치는 95 mG 였다. Fig. 7은 765 kV 옥외 GIS 신안성 변전소로 601개소 측정치의 평균치는 166.86 mG, 최대치는 1,082 mG 였다. Fig. 8은 345 kV 옥내 GIS 영등포 변전소와 부속 지하 전력구를 Emdex lite로 측정한 결과로 변전소내 평균치는 60.4 mG, 지하 전력구내 평균치는 195.96 mG, 최대치는 1,125 mG 였다.

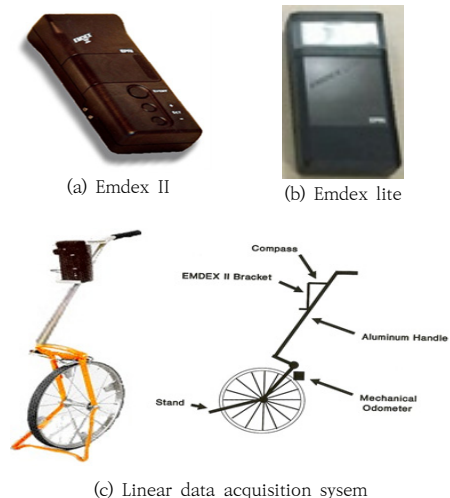


Fig. 1. Measuring instrument



Fig. 2. Measurement example by the use of Emdex II and Linda

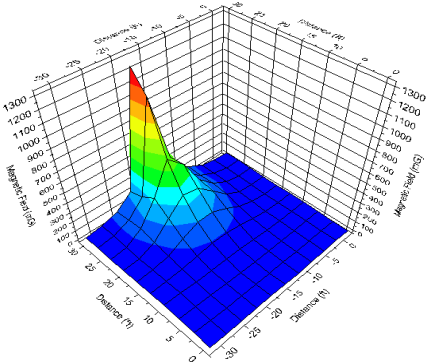


Fig. 3. Magnetic fields distribution in indoor 154 kV GIS Jangjeari substation

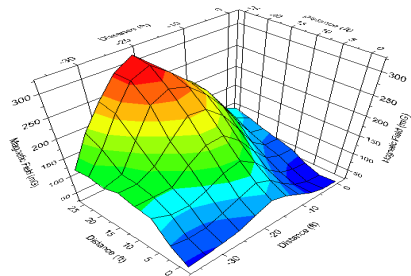


Fig. 4. Magnetic fields distribution in outdoor 154 kV steel type Seonggeo substation

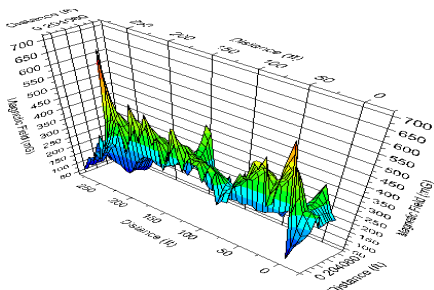


Fig. 5. Magnetic fields distribution in outdoor 345 kV GIS Asan substation

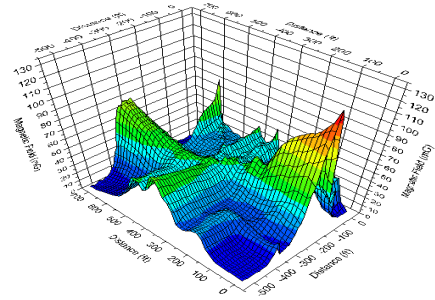


Fig. 6. Magnetic fields distribution in outdoor 345 kV steel type Shinokcheon substation

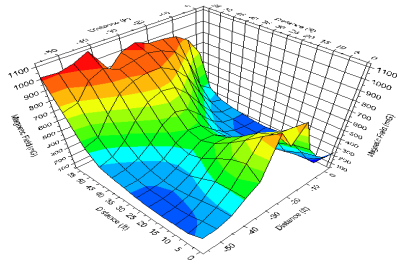


Fig. 7. Magnetic fields distribution in outdoor 765 kV GIS Shinansung substation

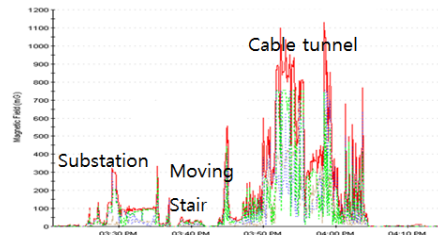


Fig. 8. Magnetic fields distribution in 345 kV GIS Yeongdeungpo substation and underground cable tunnel

이상의 결과를 종합하면 154 kV, 345 kV 모두 옥내 GIS가 옥외 철구형보다 밀집된 공간에 전력설비를 배치하여 높은 자계값을 보였다. 또한, 765 kV 변전소는 부하량이 타 변전소에 비해 월등히 많아 2.5배 이상의 높은 자계 평균값을 보였다. 지하 전력구의 경우는 순찰로가 케이블에 근접하여 가장 높은 자계값을 보였다.

## 2.2 변전설비 별 자계 노출량

여기에서는 변전소 근무자가 변전설비에 근접하여 작업하는 상황을 가정하여 자계노출량을 국제전기규격 (IEC: International Electrotechnical Commission)

62110에 의거하여 Emdex II로 Fig. 9와 같은 변전설비 표면에서 지표면 높이에 따라 측정하였고[10] 결과는 Table 1과 같다. Table 1에서 중성점 접지 리액터, 단로기에서는 2010년 국제비전리방사선방호위원회 기준인 10,000 mG를 초과하는 곳도 있었다.

### 3. 중성점 리액터 자계저감 특성

Table 1에서 알 수 있듯이 중성점 접지 리액터에서 가장 큰 자계가 발생하고 부하불평형으로 Fig. 10과 같이 3 고조파인 180 Hz와 9 고조파인 540 Hz 성분이 발생한다. 이에 비해 변압기도 변압기 내부철심의 비선형 자기포화특성에 의해 Fig. 10과 같이 NGR과 같은 성분의 고조파 성분을 발생하나 자속선이 변압기 내부철심에 집중되어 변압기 표면 자계크기가 100 mG 이하로 낮아진다. 이런 상황을 고려하여 본 저자는 참고문헌 [9]에서 기존 재료특성(비투자율 6)으로 중성점 접지 리액터 주변 근무자에 유도되는 전계를 해석한 바 있다.

본 논문에서는 중성점 접지 리액터 주변 자계가 10,000 mG 이상으로 발생할 수 있어 이를 저감할 수 있는 자성체의 특성을 주변 근무자에 유도되는 전계로 검토하였다. 검토 자성체는 철, 구소강의 두 종류로 각각의 비투자율은 60, 8,000 으로 하였다. 자계노출로 인한 유도전계와 관련한 지배방정식은 아래와 같은 Eq. (1), (2), (3)과 같다.

Table 1. Magnetic fields (mG) distribution near electrical equipments

Hight from ground	NGR	GIS incoming cable	Disconnect switch	Substation incoming cable
250 cm	11,920		11,000	6,098(head under Aφ)
200 cm	6,496	2,800	11,390	
150 cm	5,848	4,744	6,784	6,936(head under Bφ)
100 cm	5,200	7,168	6,525	
50 cm	2,488	7,424	6,257	7,080(head under Cφ)
0 cm		8,048	6,144	

$$\nabla \times E = -j\omega B \tag{1}$$

$$\nabla \cdot J = 0 \tag{2}$$

$$J = \sigma E \tag{3}$$

Where, E: induced electric field, B: magnetic flux density,  $\omega$ : angular frequency, J: induction current density,  $\sigma$ : conductivity, time differential is transformed into  $j\omega$ .

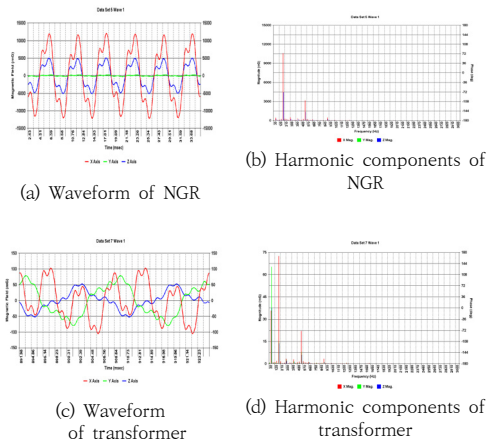


Fig. 10. Waveform and harmonic components of magnetic field on the NGR and transformer surface

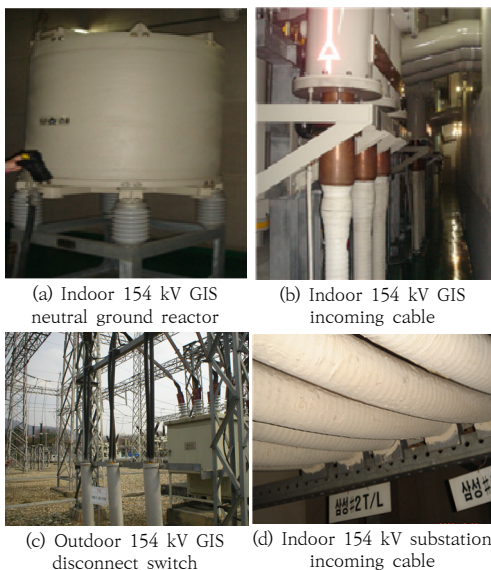


Fig. 9. Substation equipment

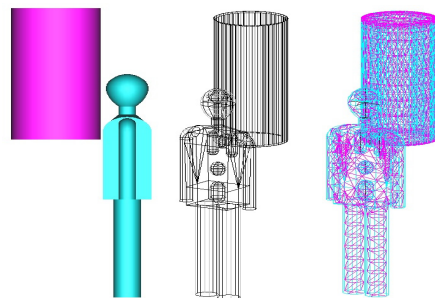


Fig. 11. Worker model near NGR and boundary element

이들 방정식을 본 논문에서는 캐나다 IES(Integrated Engineering Software)사의 3차원 경계요소법인 "Faraday 3D" 프로그램으로 해석하였으며 인체는 Fig. 11과 같이 모의하고 11,760 개의 삼각형 요소로 모델링 하였다.

NGR은 Fig. 11과 같이 길이 1 m, 외경은 42.2 cm, 외층두께는 1 mm, 코일직경은 40 cm로 지표면으로부터 1.2 m 위에 설치한 것으로 하였다. 인체는 1.7 m로 뇌, 심장, 폐, 간, 창자, 기타부분으로 Table 2의 도전을 모의하였고 NGR로부터 1 cm 이격시켰다. NGR 코일에 흐르는 전류를 180 Hz는 13,787.6 AT, 540 Hz는 1,723.5 AT 으로 하여, 차폐층이 없는 NGR 중앙부 표면에서 10,000 mG가 발생하도록 모의하였다. 이런 복합 자계에 차폐층이 없는 NGR 근처에 근무자가 노출될 때, 180 Hz 자계와 540 Hz 자계에 의해 인체내부 기관에 유도되는 최대전계는 Table 3과 같으며 폐에 최대자계가 노출되기 때문에 최대 유도전계가 발생하였다. 이 값은 2010년 국제비전리방사선방호위원회 기준인 800 mV 보다 낮았다. Table 4는 철을 차폐층으로 한 NGR 근처에 근무자가 노출될 때, 인체내부 기관에 유도되는 최대전계로 180 Hz 성분은 뇌와 심장에서는 차폐층이 없을 때보다 감소하였으나 폐, 간, 창자에서는 약간 증가하였다. 이에 비해 540 Hz 성분은 뇌, 심장, 폐, 간, 창자의 모든 기관에서 감소함을 알 수 있었다. Table 5는 규소강을 차폐층으로 한 NGR 근처에 근무자가 노출될 때 결과로, 인체내부 기관에 유도되는 최대전계가 180 Hz 성분은 모든 기관에서 20 ~ 50 배 증가하여 2010년 국제비전리방사선방호위원회 기준을 초과하는 문제를 발생하였다. 540 Hz 성분도 뇌, 심장, 창자에서는 2 ~ 5 배로 기준을 만족하나, 폐와 간에서는 40 ~ 45 배 증가하여 기준을 초과하였다. 이렇게 규소강을 차폐재로 사용할 때 인체내부 유도전계가 큰 폭으로 증가한 것은 규소강의 비투자율이 8,000으로 높아 차폐층 부근에서 자계가 높아지기 때문이다.

이것으로부터 NGR의 자계로 인한 인체건강 영향 리스크를 줄이기 위해서는 투자율이 매우 높은 규소강보다는 비투자율이 60 정도인 철을 이용하는 것이 바람직한 것으로 생각된다. Fig. 12는 차폐재 별 NGR 근처의 인체 뇌표면에 유도되는 180 Hz와 540 Hz 전계로 철과 규소강의 분포가 유사하나 규소강의 크기가 매우 큼을 알 수 있다.

Table 2. Organ conductivity (S/m) of human model[11]

Brain	Heart	Lung	Liver	Intestines	Others
0.75	0.70	0.10	0.10	0.03	0.11

Table 3. Maximum electric fields induced in a worker's organ near NGR without shield layer

Organ	Maximum electric field (mV/m)		
	180 Hz	540 Hz	180 Hz + 540 Hz
Brain	57.86	21.7	61.8
Heart	110.9	41.57	118.4
Lung	149.5	56.04	159.7
Liver	88.64	33.24	94.7
Intestines	38.23	14.33	40.8

Table 4. Maximum electric fields induced in a worker's organ near NGR with steel shield layer

Organ	Maximum electric field (mV/m)		
	180 Hz	540 Hz	180 Hz + 540 Hz
Brain	38.64	4.83	38.9
Heart	62.75	7.84	63.2
Lung	167.1	20.88	168.4
Liver	92.57	11.57	93.3
Intestines	57.55	7.194	58.0

Table 5. Maximum electric fields induced in a worker's organ near NGR with silicone steel shield layer

Organ	Maximum electric field (mV/m)		
	180 Hz	540 Hz	180 Hz + 540 Hz
Brain	2,348	88.05	2,350
Heart	2,351	88.15	2,353
Lung	6,060	2,272	6,472
Liver	3,947	1,480	3,936
Intestines	2,114	79.27	2,115

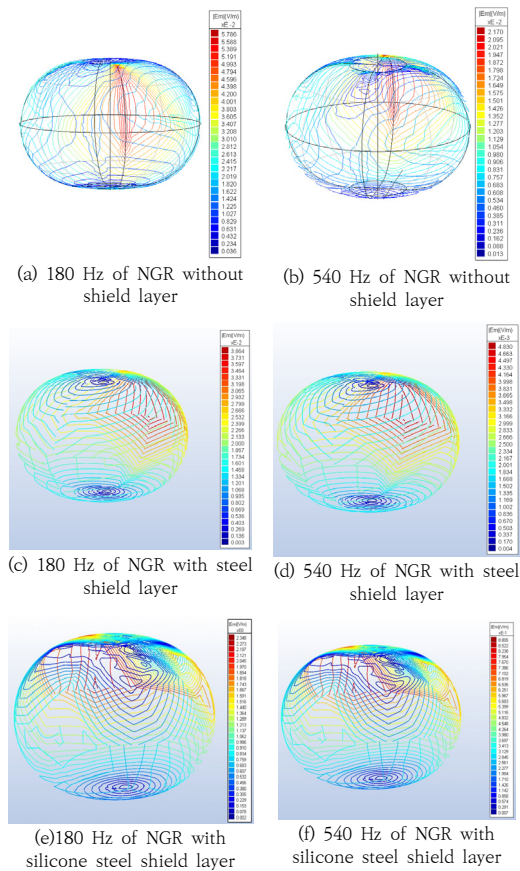


Fig. 12. Distribution of electric field induced in surface of worker's brain near NGR

#### 4. 결론

본 논문에서는 우리나라 변전소 근무자의 자계노출 상황을 검토하기 위하여 자계환경을 변전소 종류, 전압, 설비 별로 조사 하였다. 조사결과 154 kV, 345 kV 모두 옥내 GIS가 옥외 철구형보다 밀집된 공간에 전력설비를 배치하여 높은 자계값을 보였다. 또한, 765 kV 변전소는 부하량이 타 변전소에 비해 월등히 많아 2.5배 이상의 높은 자계 평균값을 보였다. 지하 전력구의 경우는 순찰로가 케이블에 근접하여 가장 높은 자계값을 보였다. 설비별로는 중성점 접지 리액터, 단로기에서 2010년 국제비전리방사선방호위원회 기준인 10,000 mG를 초과하는 곳도 있었다.

중성점 접지 리액터 자계 차폐재로는 철은 인체 내부 기관에 유도되는 전계를 감소시킬 수 있으나 구조상은

높은 비투자율로 인해 오히려 자계가 인체 내부기관으로 집중되어 유도전계가 매우 커지는 현상을 보였다.

#### References

- [1] P. A. Demers, D. B. Thomas, A. Sternhagen, W. D. Thompson, M. G. Curnen, W. Satariano, D. F. Austine, P. Issacson, R. S. Greenberg, C. Key, L. K. Kolonel, D. W. West, "Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men", *Am. J. Epidemiol.*, vol. 132, pp. 775-776, 1991.
- [2] G. Theriault, M. Goldberg, A. B. Miller, B. Armstrong, P. Guenel, J. Deadman, E. Imbernon, T. To, A. Chevalier, D. Cyr, C. Wall, "Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France-1970-1989", *Am. J. Epidemiol.*, vol. 139, pp. 550-572, 1994.
- [3] D. A. Savitz, D. P. Loomis, "Magnetic field exposure in relation to leukaemia and brain cancer mortality among electric utility workers", *Am. J. Epidemiol.*, vol. 141, pp. 123-134, 1995.
- [4] A. Modenese, F. Gobba, "Occupational Exposure to Electromagnetic Fields and Health Surveillance according to the European Directive 2013/35/EU", *Int. J. environ. Res. Public Health*, Vol.18, No.4, 1730, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18041730>
- [5] 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.*, vol. 74, pp. 494-522, April 1998.
- [6] 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.*, vol. 99, pp. 818-836, December 2010.
- [7] 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. Available From: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32013L0035> (accessed June 25, 2021)
- [8] S. W. Min, S. H. Lee, "Characteristics of the Current Density Induced Inside a Worker Near a Neutral Ground Reactor", *Trans. KIEE* Vol. 59, No. 10, pp. 1856-1861, 2010.
- [9] S. W. Min, "Characteristics of Electric Fields Induced

Inside a Worker Exposed to Multiple Frequency Magnetic Fields of Neutral Ground Reactor", *18th International Symposium on High Voltage Engineering*, Seoul, Korea, PA-10, August 2013.

- [10] IEC 62110, "Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure", 2009.
- [11] P. Baron, et al., "Magnetically induced currents in human body", IEC Trend Assessment, 1995.

---

민 석 원(Suk-Won Min)

[정회원]



- 1984년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1984년 2월 ~ 1991년 8월 : 한전 전력연구원 선임연구원
- 1991년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

고전압, 전기환경장해