

무선전력전달 시스템의 전자계 노출에 대한 인체 안전 평가

김윤명 (단국대학교)

I. 서론

니콜라 테슬라(Nikola Tesla, 1856~1943)에 의해 처음으로 무선전력전송이 제안된 후로 100년이 넘는 기간 동안 다양한 무선전력전송 기술이 개발되었지만, 실생활에 적용은 미약한 실정이다. 하지만 2007년 MIT의 Marin Soljacic 연구팀에서 비방사형 자기공진형 무선전력전달 시스템을 제안함으로써 새로운 전기를 맞이하고 있다^[1,2].

전자파에 과다노출되면 인체에 유해할 수 있다는 연구 결과 이후 세계보건기구 (WHO, World Health Organization)는 1996년부터 International EMF Project를 수행하고 있으며, IARC (International Agency for Research on Cancer)에서는 2002년도에 극저주파 전자계를 발암물질 2B 등급 (Possibly Carcinogenic)으로 분류하였으며, 2011년 5월에는 Interphone Study의 연구 결과에 따라서 이동 단말기(휴대폰)의 전자파도 발암물질 2B로 분류하였다^[3]. 전자파의 인체 영향에 대한 연구는 지금도 꾸준히 지속되고 있는 상태이며, 휴대폰 전자파에 대한 발암물질 등급에 대한 논란도 지속되고 있다.

본 기고에서는 무선전력전송에서의 인체 안전성 평가에 대하여 살펴보고자 한다.

II. 무선전력전송 기술의 종류와 전자계 (전자파) 노출 문제

1. rectenna 방식

Rectenna를 이용한 무선전력전송 기술은 마이크로파(수

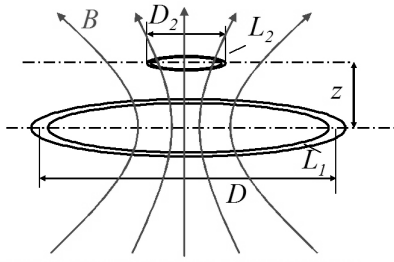
GHz)를 이용하여 고전력을 방사한 후 원거리 수신단에서 전력을 수신하는 방식이다. 이 방식은 "Satellite Power System (SPS)"라고도 불리우며, 태양전지를 장착한 위성을 쏘아 올려 우주에서 생산한 전력을 2.45 GHz 또는 5 GHz의 주파수로 변환되어 사막에 설치된 지상안테나(Array Antenna)에 공급하고자 제안되었으며, 2008년 Managed Energy Tech LLC(Limited Liability Company), 일본의 Kobe University 그리고 Texas A&M University와 공동연구로 148 km (Island of Maui(on Haleakala) to the island of Hawaii(Mauna Loa)) 거리에서 무선전력전송을 성공하였다. 국내에서는 전기연구원에서 1997년 100 W급 무선 전력 전송 장치를 개발하였고, 1999년에 10 kW급 무선전력전송 장치를 세계에서 3번째로 개발하였다. 이 방식은 전력전송 효율성이 낮다는 것과 고주파 전력 전송 통로 속에서 생명체에 영향을 줄 수 있어 송수신안테나의 범위내에 생명체가 접근할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

2. 자기(磁氣) 유도방식

자기(磁氣) 유도방식은 <그림 1>과 같이 두 개의 코일로 이루어져있으며, 송신코일에서 발생된 자기장이 수신코일에 유도되어 전력을 전달하는 방식이다. 하지만 두 코일의 상대적 위치와 거리에 따라서 전송 효율이 급격하게 감소하는 특성을 나타낸다. 따라서 자기(磁氣) 유도 방식은 비접촉형 방식이라고도 불린다.

자기(磁氣) 유도방식은 현재까지 가장 많은 연구가 이루어진 분야이나, 우리가 흔히 사용하는 전동칫솔(<그림 2>)이나 일부 무선 면도기 등 극히 제한적으로 적용되어왔다.

모바일 단말기(휴대폰)의 무선충전과 관련하여 2008년에



〈그림 1〉 자기(磁氣) 유도방식 무선전력전달 장치 개념도



〈그림 4〉 Fulton사의 eCoupled 무선충전시스템



〈그림 2〉 자기(磁氣) 유도방식 중 가장 실용화된 전동칫솔



〈그림 5〉 한림포스텍에서 개발한 무선충전 시스템

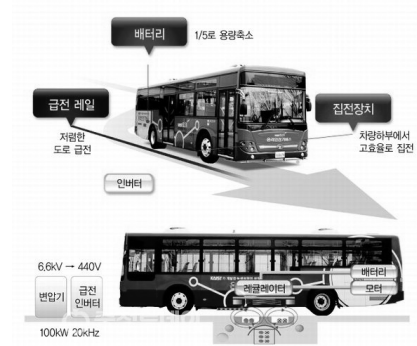
WPC (Wireless Power Consortium)가 설립되었고, 2010년 6월에 무선단말기 충전과 관련된 표준안(Qi)을 발표하면서^[4], 무선충전 표준을 만족하면서 핸드폰이나 PDA, MP3 플레이어, 노트북 컴퓨터까지 충전할 수 있는 자기(磁氣) 유도형 무선충전 시스템이 개발되어 출시되고 있다. 그 중 대표적인 제품은 〈그림 3〉에 보인 영국의 Splash- Power Ltd.가 개발한 스플래시 파워매트이다.

또한 Fulton Innovation, LLC.은 다양한 제품을 통합할 수 있는 “eCoupled”라는 〈그림 4〉와 같은 무선 충전기기를 발표하였다. Splash- Power와 같이 자기(磁氣) 유도방식을 이용한 eCoupled는 최고 1,400 Watt까지 전력을 공급할 수 있으며, 98 %의 전송 효율을 가지고 있다^[5].

국내에서는 한림포스텍에서 〈그림 5〉와 같은 자기(磁氣) 공진방식을 이용한 스마트폰용 무선충전 시스템을 개발하여 상용화하였으며, LG전자와 삼성전자에서도 자기 유도방식으로 충전 가능한 무선충전시스템을 개발하여 상용화 단계에 있다. 이러한 기술들을 위한 무선충전 시스템 특히 자속을 발



〈그림 3〉 Splash-Power Ltd.의 무선 충전패드, 여러 개의 휴대단말기를 패드위에 올려놓아 동시에 충전이 가능하다



〈그림 6〉 KAIST에서 개발한 온라인 전기자동차 개념도

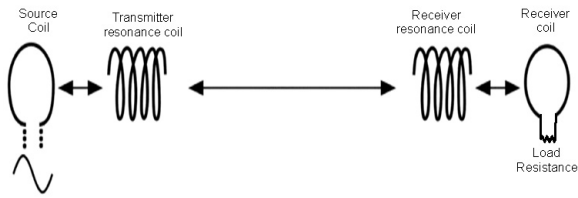
생시키는 측에서의 인체 안전성 평가를 위해서 IEC 62233 기준을 적용할 수 있고, 그 안전기준은 ICNIRP Guidelines 1998^[6]과 ICNIRP Guidelines 2010^[7] 그리고 IEEE C95.6 2002^[8]을 적용할 수 있다.

자기유도 방식을 이용한 무선 충전 방식의 또 다른 적용 분야는 전기자동차 분야로 KAIST에서 개발한 온라인 전기자동차(OLEV, On-Line Electric Vehicle)가 있다^[9]. 〈그림 6〉은 KAIST에서 개발한 OLEV의 개념도를 나타낸 것이다. 온라인 전기자동차는 20 kHz 주파수를 사용하고, 20 kW의 전력을 20 cm 거리에서 80 %의 전송효율로 전송할 수 있다.

현재 전기교통 시스템에 의한 전자계 노출 측정방법은 정해진 것이 없으나, 국내의 방송통신위원회에서는 IEC 62110을 적용할 예정으로 있다^[10].

3. 자기(自己) 공진형 무선전력전송 방식

2007년 MIT 물리학과와 Marin Soljacic 교수 연구팀에서



〈그림 7〉 자기(자기) 공진형 무선전력전달 시스템의 개념도



〈그림 8〉 MIT의 자기(자기) 공진형 무선전력전달 장치 시연 모습. 전송통로에 사람들이 있어도 전송에 큰 문제가 없음을 보이고 있으나, 전송통로 범위 내에서의 전자계 안전문제는 언급되지 않고 있다

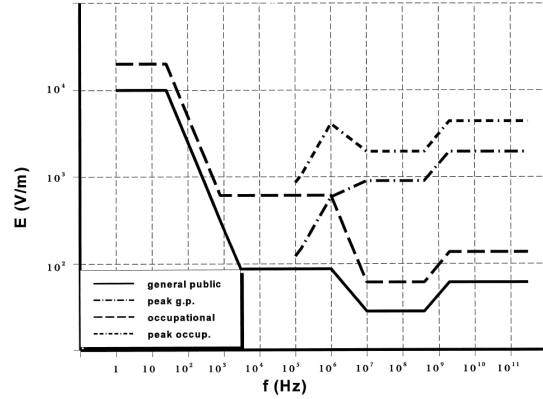
발표한 자기(자기) 공진형 무선전력전송 방식은 기존의 무선 전력 전송방식과는 새로운 개념의 전송기술 방식이다. 〈그림 7〉은 자기(자기) 공진형 무선전력전송의 개념도를 나타낸 것이다.

이 방식은 송신기와 수신기가 같은 공진주파수를 갖도록 송수신의 공진코일을 가지고 있으며, 근거리에서 자기(磁氣) 유도방식에 비하여 높은 전송효율을 갖는다. 특히, 이 기술은 비(非)방사형(Non-radiative)으로서, 공진 주파수를 가진 수신기가 존재할 때에만 수신기기로 전력이 전송되고 공진주파수가 맞지 않으면 전력이 전송되지 않는 구조로 되어있어, Retenna 방식과 비교하여 다른 기기나 인체에 영향을 덜 주는 방식으로 알려져 있으나, 필자는 그 주장에 의문을 가지고 있다.

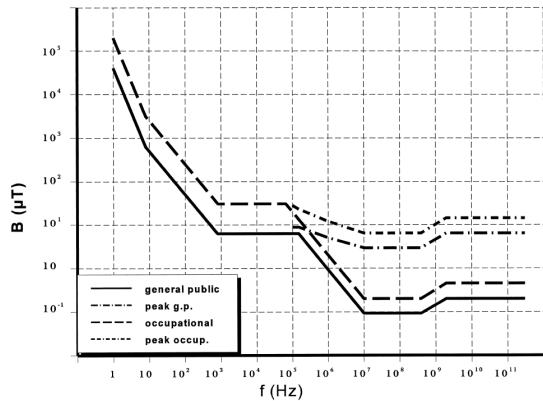
자기(자기) 공진형 무선전력전달 시스템의 주파수는 10 MHz 대역에서 수십 kHz ~ 100 kHz 대역으로 주파수가 낮아지고 있다. 그 이유는 주파수에 따라 인체안전기준에의 부합성의 난이도가 다르고, 송수신 경로 사이에 인체가 삽입될 때 고주파에서 공진 특성의 변화가 더 큰 것이 확인되었기 때문이다.^[11]

Ⅲ. 전자파의 인체보호기준

전자파의 인체영향에 대한 연구는 전력선 주파수에 의하여 소아 백혈병이 증가할 수 있다는 연구 보고로 인하여 1996



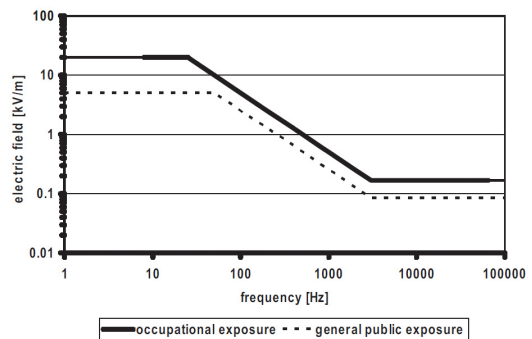
〈그림 9〉 전기장의 인체보호기준(ICNIRP Guidelines 1998)^[6]



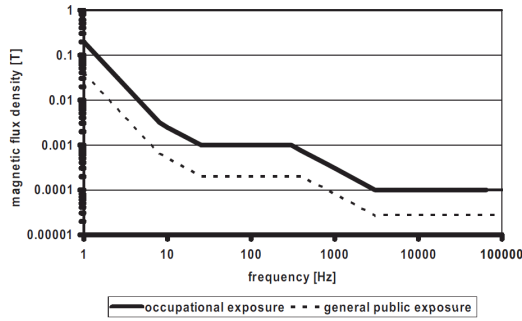
〈그림 10〉 자기장 인체보호기준(ICNIRP Guidelines 1998)^[6]

년도에 세계보건기구(WHO, World Health Organization)에서 International EMF Project를 구성하였고, 지식의 교류를 통하여 세계적인 공감대 형성을 위하여 노력하고 있다.

대표적인 전자파 인체보호기준은 ICNIRP와 IEEE의 인체 보호기준이며, 국내의 전자파 인체보호기준은 ICNIRP의 1998년도 기준을 채택하고 있다^[12]. 〈그림 9〉와 〈그림 10〉은 1998년도 ICNIRP의 전기장과 자기장에 대한 인체보호기준을 나타낸 것이고, 〈그림 11〉과 〈그림 12〉는 2010년도에 개정된 ICNIRP의 전기장 및 자기장 노출 기준을 나타낸 것이다. 2010년도에 개정된 ICNIRP 기준은 1 Hz ~ 100 kHz까지의 주파수에 대한 노출 제한이며, 1998년도 ICNIRP 기준은 300



〈그림 11〉 전기장 인체보호기준(ICNIRP Guidelines 2010)^[7]



〈그림 12〉 자기장 인체보호기준(ICNIRP Guidelines 2010)^[7]

〈표 1〉 IEEE Standards, Magnetic field limits for general public exposure : exposure of head and torso

| Frequency Range [Hz] | B[mT] | H[A/m] |
|----------------------|----------|----------------------|
| <0,153 | 118 | 9.39×10^4 |
| 0,153 ~ 20 | $18.1/f$ | $1.44 \times 10^4/f$ |
| 20 ~ 759 | 0,904 | 719 |
| 759 ~ 3,000 | $687/f$ | $5.47 \times 10^5/f$ |
| 3,000 ~ 100 kHz | | 164 |

GHz까지의 노출 제한 기준치이다. 50 Hz 주파수에서 2010년도 기준치는 1998년도보다 2배 (100 μ T에서 200 μ T) 높아졌다. 국내에서는 2010년도 ICNIRP Guidelines를 인체보호 기준으로 변경할 계획을 아직 갖고 있지 않다. IEEE C95. 6 : 2002 인체보호기준은 〈표 1〉에 나타내었다.

무선전력 전달에 사용되는 주파수는 전력전송 방식에 따라 다르다. 〈표 2〉에서 무선전력전송 방식에 따라 사용되는 주파수를 나타내었다.

〈표 2〉 무선전력전송 방식에 따른 사용주파수

| 전력전송방식 | 사용주파수 |
|---------------|-----------------|
| Rectenna 방식 | 수백 MHz ~ 수십 GHz |
| 자기(磁氣)유도방식 | ~ 수백 kHz |
| 자기(自己) 공진형 방식 | ~ 수십 MHz |

IV. 전자계 인체 안전 평가

무선전력전달 시스템의 인체 안전 평가 방법에 대하여 적용할 수 있는 국내 및 국제 기준은 현재까지 제정되어 있지 않으며, 적용할 수 있는 가장 근접한 것은, IEC 62311 “Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz ~ 300 GHz)” 과 IEC 62233 “Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure”이다.

IEC 62311에서는 전자파의 평가 방법의 종류와 평가절차에 대하여 제안하고 있으며, IEC 62233에서는 전자기파를 발생하는 가정용 전자전기에 대한 전자파 측정 방법에 대하여 규정하고 있다^[13,14].

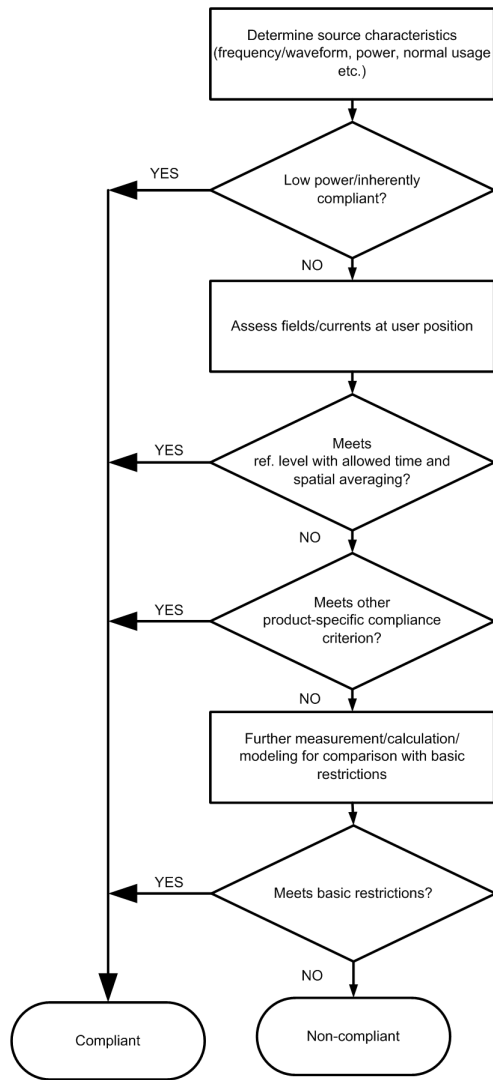
전자파 인체영향 평가 방법은 〈표 3〉에 나타내었으며, 평가 절차는 〈그림 13〉에 나타내었다.

전자파 측정 방법에는 전기장 측정법과 자기장 측정법이 있으며, IEC 62233에서는 자기장 측정법에 대하여 제안하고 있다. 고려 대상인 주파수 범위는 10 Hz ~ 400 kHz이며, 자속밀도 측정값은 각 방향에서 100 cm² 이상의 면적에서 평균

〈표 3〉 노출 평가 방법 리스트

| Assessment methods | Applicability area and limitations |
|--|--|
| Far field calculation | Electromagnetic fields far from source. Very small microwave equipment not used close to body, or large lower – frequency transmitters at greater distances. That region of the field of an antenna where the angular field distribution is essentially independent of the distance from the antenna. In this region (also called the free space region), the field has a predominantly plane-wave character, i.e., locally uniform distribution of electric field strength and magnetic field strength in planes transverse to the direction of propagation |
| Near field calculation | Electromagnetic fields very close to the source. There can be an interaction between the radiated fields from the source and the user |
| Simulation with/without a phantom | Evaluation of measurement results inside the phantom representing a body |
| Numerical modelling | Calculation only |
| Body/limb current | Measurement or calculation |
| SAR | Calculation and measurements : 100 kHz – 10 GHz for modelling |
| E and H measurement | Near or far field, Direct measurement for comparison with reference levels or as input for more detailed assessment |
| Source modelling | Prediction of exposures from calculation of emissions at a specific distance |
| Direct measurement of physical properties: Contact current | |

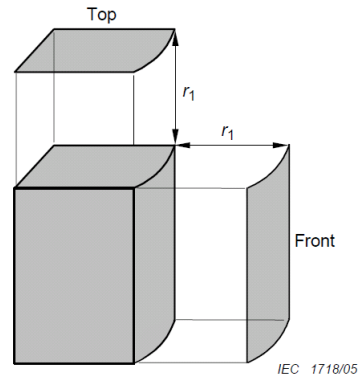
The physical characteristics and intended use of the equipment may have an impact on the choice of assessment method. E.g., radiators of EMF for intended use in close proximity to the body shall be assessed differently from transmitters intended for fixed installations in buildings.



〈그림 13〉 인체 노출 평가 절차

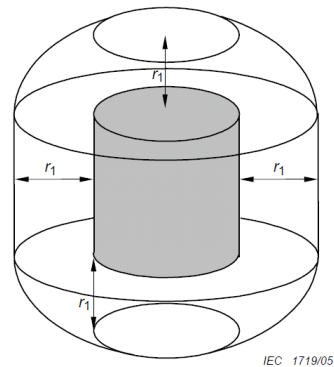
을 구하며, 센서의 크기는 외부지름이 13 cm를 초과해서는 안 된다. 자기장 측정은 독립적인 자기장 발생원을 고려하여 최고 측정값을 취해야 하며, 최종값의 90%에 도달하는데 걸리는 측정 장비의 응답 시간은 1 sec를 초과하지 않아야 한다. 인체부위와 접촉한 상태에서 사용하는 기기의 측정이력

거리는 0 cm이고, 그 밖의 기기는 30 cm 거리에서 측정하도록 하고 있다. 이때 피시험기기의 동작조건은 전자계 발생량이 최대가 되도록 설정하여야 한다. 〈표 4〉는 무선전력과 관련된 가정용 전기기기의 자기장 측정거리, 센서위치 및 동작 조건을 나타낸 것이다. 〈그림 14〉와 〈그림 15〉는 〈표 4〉의 자기장 측정시 센서의 위치를 나타낸 것이다.



센서는 기기의 상단/정면에서 거리 r_1 만큼 떨어진 표면위에서 움직인다.

〈그림 14〉 〈표 4〉의 센서 측정위치 : 상단/정면

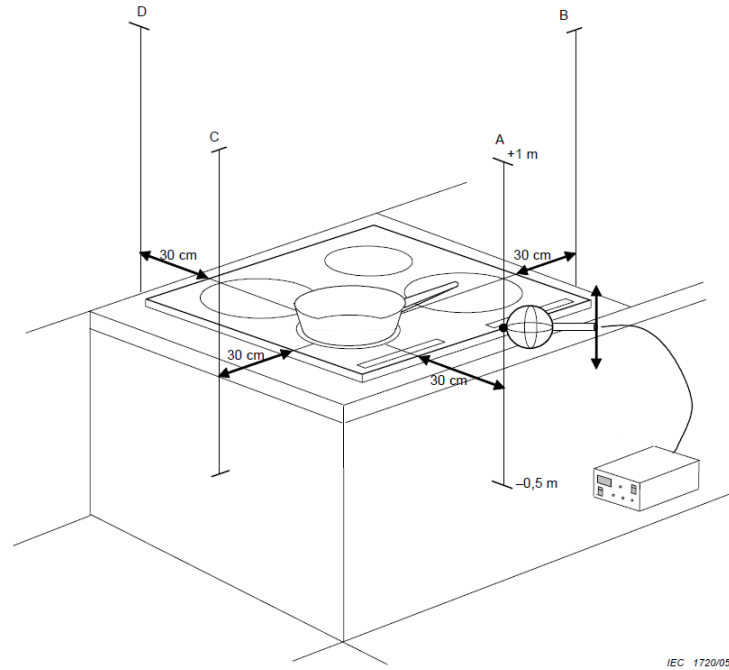


센서는 기기의 상단/정면에서 거리 r_1 만큼 떨어진 표면위에서 움직인다.

〈그림 15〉 〈표 4〉의 센서 측정위치 : 사방

〈표 4〉 무선전력과 관련된 가정용 전기기기의 자기장 측정 위치

| 기기 유형 | 측정 거리 r_1 사용 설명서에서 별도의 규정이 없는 경우 | 센서 위치 | 동작 조건 |
|--|--|-----------|--|
| 배터리 충전기 (유도 충전기 포함) | 30 cm | 사방 | 제조사가 명시한 최고 용량을 갖는 빈 축전기를 충전하는 동안 |
| 온열 매트 | 30 cm | 상단 | 단열 판 위에 펼쳐 놓음 |
| 보온 패드 | 0 cm | 상단 | 단열 판 위에 펼쳐서 놓음 |
| 전기 레인지 (호브) | 30 cm | 상단, 정면 | 각 전열장치를 개별적으로 최대 설정으로 하여 IEC 60335-2-6의 3.1.9항에 따름 |
| 유도 전기 레인지 및 열판 | | | 〈그림 16 참조〉 |
| Microwave oven (RF 부분은 IEC 60335-2-25에서 다룬다) | 30 cm | 사방 | 마이크로파 세기를 최대로 연속, 적용 가능한 경우, 기존의 전열 소자는 최대 설정으로 동시에 동작시킨다. 부하는 수돗물 1리터이며, 선반 중심에 놓는다. 물 용기는 유리나 플라스틱 등 비도전성 물질로 만들어야 한다. |



선 A, B, C, D는 측정 위치를 나타낸다. 그림은 동작하고 있는 4구 전기레인지의 유도 전열소자의 정면 왼쪽을 나타낸 것이다.

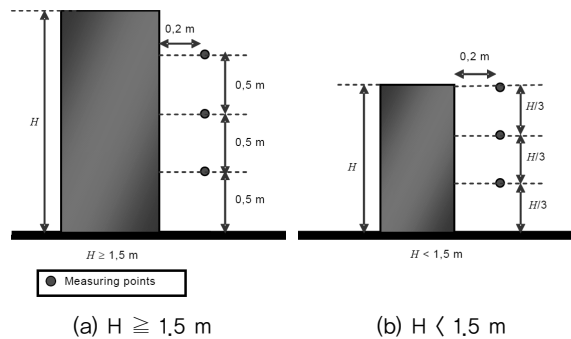
〈그림 16〉 유도 전기레인지와 열판의 측정 거리

유도 전기 레인지의 자기장 측정법은 〈그림 16〉과 같이 기기 가장자리에서 센서 표면까지 30 cm 떨어진 위치에서 수직선(A, B, C, D)을 따라 각 조리구(cooking zone)를 측정한다. 다만 기기가 벽면에 기대어 사용하도록 설계된 것이라면, 기기 뒷면(선 D)에서는 측정하지 않는다.

그리고 측정시 유도 전기 레인지의 동작 조건은 아래와 같이 설정한 후 시험한다.

- 수돗물을 대략 반쯤 채운 에나멜을 칠한 스틸조리용기를, 측정할 조리구의 한 가운데에 놓는다.
- 사용 설명서에서 권고한 가장 작은 용기를 사용한다. 권고하지 않은 경우에는 표시된 조리구를 덮는 가장 작은 표준 용기를 사용한다. 표준 조리용기의 밑면 지름은 110 mm, 145 mm, 180 mm, 210 mm, 300 mm이다.
- 유도 전열 장치를 번갈아 동작시킨다. 이때 다른 조리구는 덮지 않는다.
- 에너지 조절기 설정값을 최대로 설정한다.
- 안정적인 동작 조건에 이르면 후, 측정을 실시한다.
- 안정적인 조건에 이르지 않을 경우에는, 자기장 발생원에서 최대값에 도달하기에 적합한 관찰시간(예: 30초)을 정해야 한다.

(주) 유도 전열 장치에 전력이 나뉘지므로 각 전열 장치를



〈그림 17〉 IEC 62110의 3점 측정법

개별적으로 동작시킬 때 최고 자기장 및 연속 자기장을 얻는다.

KAIST에서 개발한 온라인 전기자동차(OLEV)에서 발생하는 자기장 측정 방법은 IEC 62110의 기준 중 3점 측정법을 적용하고 있다. 세 점의 자기장 평균값을 구하여 노출안전기준과 비교하여야 한다. 〈그림 17〉은 온라인 전기자동차에서 발생하는 자기장 측정 위치를 나타낸 것이다. 온라인 전기자동차의 경우 차체가 1.5 m 보다 높으므로 〈그림 17〉-(a)의 측정 방법을 적용하고 있다.

V. 결론

본 고(稿)에서는 무선전력전송 방식에 따른 인체 보호기준

과 안전성 평가에 대하여 조사 분석하였다. 또한 주요한 전력 산업 설비나 가전기기의 주변에서 전자기장 측정 방법과 그 안전 기준을 소개하였다.

참고문헌

- [1] M. Soljagic et al., "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," Science, pp.83-86, June, 2007.
- [2] 김진욱, 지현호, 최연규, 윤영현, 김관호, 박영진, "자기 공명 무선 전력 전송 시스템에서 공진코일의 배열에 관한 연구," 한국전자파학회논문지, 제21권 제6호, Jun., 2010.
- [3] 김남, "RF 전자파 WHO/IARC 2B 등급 판정과 의미," 한국전자파학회 프로시딩 of 제15회 전자기장의 생체 영향에 대한 워크샵, Aug., 2011.
- [4] Homepage of Wireless Power Consortium, <http://www.wirelesspowerconsortium.com>
- [5] Homepage of Fulton Innovation LLC, <http://ecoupled.com>
- [6] ICNIRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)," Health Physics 74 (4): 494-522; 1998.
- [7] ICNIRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)," Health Physics 99(6):818-836; 2010.
- [8] IEEE C95.6 ; IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz, 2002.
- [9] Homepage of OLEV, www.olev.co.kr
- [10] IEC 62110-Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure, Aug., 2009.
- [11] 김윤명, "무선전력전송의 인체 안전성 평가 연구," 대한전자공학회 프로시딩 of 최신 무선 전력 전송 동향 및 핵심기술 워크샵, Aug., 2011.
- [12] 방송통신위원회 고시 제2009-27호, "전자파 인체보호 기준", 11월. 2009년.
- [13] IEC 62311-Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz ~ 300 GHz), Aug., 2007.
- [14] IEC 62233-Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure, Oct., 2005.



김 윤 명

1975년 1월 서울대학교 공과대학 전자공학과 학사.
 1977년 2월 한국과학원 전기 및 전자공학과 석사.
 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사.
 1977년 3월~1980년 2월 금성정밀공업주식회사.
 1980년 3월~현재 단국대학교 공과대학 전자전기공학부 교수.
 2000년 6월~현재 (주)EMF Safety 대표이사.
 <관심분야> 전자파 인체 영향, 전자파 노출량 측정, 무선 전력전달