

# 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 인체 안전성 평가 방법에 대한 고찰

주영준  
단국대학교

## 요약

본고에서는 국내외의 전자파 인체보호기준을 살펴보고, 128 kHz 자기 공명형 무선전력전송 시스템에서 발생하는 전자파에 의한 인체 안전성 평가방법에 대하여 알아본다.

## I. 서론

무선통신 기술의 발달로 인하여 시간과 장소에 구애 받지 않고, 휴대단말기를 이용하여 무선 데이터 통신을 할 수 있게 되었다. 이에 따라 하루 중 많은 시간 동안 휴대단말기를 사용하게 되었고, 배터리 소모가 빨라, 휴대단말기 충전을 위하여 충전기를 들고 다니면서 휴대단말기를 충전하는 것이 일상화되었다. 이런 유선에 의한 충전의 불편함을 해소하기 위하여, 무선전력전송에 의한 휴대단말기 충전에 대한 소비자들의 요구는 증가하였다. 무선전력전송 기술은 1897년에 니콜라 테슬라(Nikola Tesla, 1856 ~ 1943)에 의해 처음으로 제안되었으며 [1], 그 후로 다양한 무선전력전송 기술이 개발되었으나, 상용화는 미미하였다. 하지만 스마트폰의 보급으로 인하여 무선충전에 대한 소비자의 요구가 증가하였고, 2008년 미국의 Fulton사의 주도로 WPC(Wireless Power Consortium)이 결성되었다. WPC는 2010년 6월에 무선전력전송 기술 중 자기유도방식에 의한 무선단말기 충전 표준안(Qi)를 발표하였으며, Qi 기준을 만족하는 무선충전 시스템이 상용화 되고 있다[2].

무선전력전송 기술은 자기(磁氣)유도 결합방식, 마이크로파 방사 방식, 자기(磁氣)공명 방식으로 나누어진다[3][4]. 위 방식은 모두 전자파를 이용하여 무선으로 전력을 전달하므로, 전자파가 발생하게 된다. 미약한 전자파가 인체에 악영향을 준다는 명확한 연구결과는 아직 없지만, 극저주파 전자계가 소아암을 일으킬 수 있다는 역학연구 결과 등으로 인하여 전자파의 인체 영향에 대한 불안감은 계속되고 있다[5].

세계보건기구(WHO, World Health Organization) 산하의

국제암연구소(IARC, International Agency for Research on Cancer)에서는 2002년에 ELF(Extremely Low Frequency) 자기장을 발암물질 등급 2B(Possibly Carcinogenic to Human)로 분류하였고, 2011년 5월에 RF 전자파에 대해서도 발암물질 등급 2B로 분류하였다[6]. <표 1>은 IARC의 발암물질 등급 분류 기준을 나타낸 것이다.

표 1. IARC의 발암물질 등급 분류 기준

| 분류 | Group 1   | Group 2A  | Group 2B   | Group 3  | Group 4                      |
|----|---|---|--|--|------------------------------|
| 정의 | 발암 물질   | 발암 가능성이 있음  | 발암 가능성이 있으나 확실하지 않음  | 분류되지 않음  | 발암 가능성 없음                    |
| 내용 | 사람의 암 발생과 관련되어 증명된 증거가 있음   | 사람에 대해서는 제한적인 증거가 있으나, 동물실험에서도 암 발생과 관련된 충분한 증거가 있음         | 사람에 대해서는 제한적인 증거가 있으나, 동물실험에서는 암 발생과 관련된 충분한 증거가 없음  | 유요한 정보에 근거하여 분류할 수 없는 증거가 있음                     | 사람에 대해서 암 발생이 되지 않는다는 증거가 있음 |
| 물질 | 107개 물질: 술, 석면, 비소, 벤젠, 포름알데히드, 전리방사(모든 경우), 담배 연기(흡연 및 비흡연), 페인트공(직업적노출), 햇빛(일사) 등 | 59개 물질: 미용사 및 이발사(직업적노출), 정유(직업적노출), 교대근무자(일반적인수면 패턴에 방해) 등 | 266개 물질: 커피, 디젤(연료), 해양 근무, 드라이클리닝(직업적노출), 소방관(직업적노출), 합성수지, 방직 공장(근로자), 자기장(ELF), 절인 야채 등 | 508개 물질: 아크릴산, 염소화식수, 염색약(개인사용자), 형광, 전기장(ELF) 등 | 1개 물질: 카프록락탐(독극물)            |

본고에서는 각국의 전자파 인체보호기준에 대하여 알아보고, 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 인체 안전성 평가 방법에 대하여 고찰하고자 한다.

## II. 전자파 인체보호기준

세계보건기구(WHO)에서는 전자파 인체 안전에 대하여 자국의 실정에 맞추어 사전예방주의 정책 (Precautionary Principle)을 권고하고 있으며[6], 각 나라에서는 자국의 실정에 맞는 전자파 인체보호기준을 제정하여 관리하고 있다. 대표적인 전자파 인체보호기준에는 국제비전리복사보호협회(ICNIRP, International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection)에서 1998년도에 제정한 기준과, 2010년도에 100 kHz 이하 대역에 대하여 개정한 기준 그리고 IEEE의 인체보호기준이 있다[7][8][9][10]. 대부분의 나라에서는 ICNIRP에서 1998년도에 제정한 인체보호기준을 자국의 전자파 인체보호기준으로 사용하고 있으며, 국내에서도 ICNIRP의 1998년도 기준을 국내 기준으로 인용하여 사용하고 있다.

### 1. 국외의 전자파 인체보호기준

국외의 전자파 인체보호기준 중 가장 대표적인 인체보호 기준은 ICNIRP Guideline 1998(DC ~ 300 GHz), ICNIRP Guideline 2010(DC ~ 100 kHz), IEEE Std. C95.1(3 kHz ~ 300 GHz) 및 IEEE Std. C95.6(DC ~ 3 kHz) 등이 있다. 전자파의 인체 영향은 그림 1과 같이 극저주파에서는 자극작용이 고주파에서는 열 작용 발생한다. 그리고 100 kHz ~ 10 MHz 대역에서는 자극작용에서 열 작용이 동시에 공존한다.

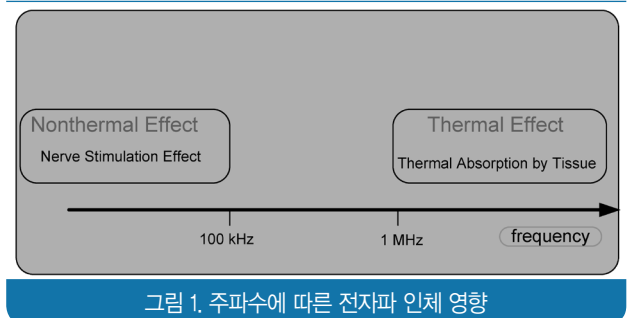


그림 1. 주파수에 따른 전자파 인체 영향

ICNIRP의 전자파 인체보호기준에서 전자파 노출 제한은 기본한계치(Basic Restriction)와 노출제한치(Reference Level)로 나누어져 있다. 기본제한치는 인체가 전자기장에 노출되었을 때 생물학적 반응이 발생하는 기본 한계치를 의미하며, 노출제한치는 기본제한치로 사용되는 인체 내부 유도전류밀도, 인체 내부 전계 강도 및 SAR을 직접 측정하는 것이 불가능하거나 매우 어렵기 때문에 기본제한치에서 유도된 환경 전자기장 세기이며, 실질적인 전자기장 노출제한치이다. ICNIRP Guidelines 1998에서는 1 Hz ~ 10 MHz 대역에서 자극작용에 대한 기본제한치로 인체내부의 유도전류밀도를, 100 kHz ~ 10 GHz 대역에서 열작용에 대한 기본제한치로 전신(whole body)

및 국부(localized tissue) 전자파비흡수율(SAR)을 제공하고 있으며, ICNIRP Guidelines 2010에서는 자극작용에 대한 기본제한치인 인체 내부의 유도 전류밀도를 인체 내부의 전기장 세기로 바꾸었다. 100 kHz ~ 10 MHz 대역에서는 유도전류밀도 및 SAR을 동시에 만족하여야 한다.

<표 2>는 ICNIRP Guidelines 1998의 일반인에 대한 기본제한치를 나타낸 것이다.

표 2. ICNIRP Guidelines 1998의 기본 제한치[7]

| Frequency        | Current density for head and trunk (mA/m <sup>2</sup> )(rms) | Whole-body average SAR (W/kg) | Localized SAR (head and trunk) (W/kg) | Localized SAR (limbs) (W/kg) |
|------------------|--|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Up to 1 Hz       | 8  | —                             | —                                     | —                            |
| 1 ~ 4 Hz         | 8/f  | —                             | —                                     | —                            |
| 4Hz ~ 1 kHz      | 2  | —                             | —                                     | —                            |
| 1 ~ 100 kHz      | f/500  | —                             | —                                     | —                            |
| 100 kHz ~ 10 MHz | f/500  | 0.08                          | 2                                     | 4                            |
| 10 MHz ~ 10 GHz  | —  | 0.08                          | 2                                     | 4                            |

<그림 2>와 <그림 3>은 전기장과 자기장에 대한 ICNIRP Guidelines 1998의 제한기준치를 나타낸 것이다[7].

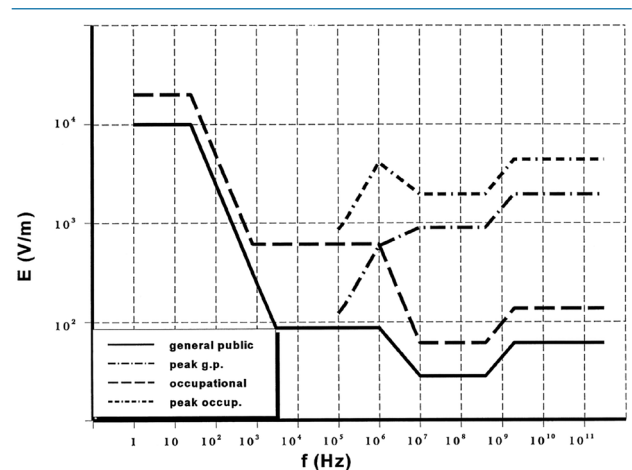


그림 2. 전기장에 대한 노출제한치 (ICNIRP Guidelines 1998)

<표 3>은 IEEE C95.1(2005)와 IEEE C95.6(2002)의 인체보호기준을 나타낸 것이고, <표 4>는 각국의 SAR 기준치를 나타낸 것이다[9][10].

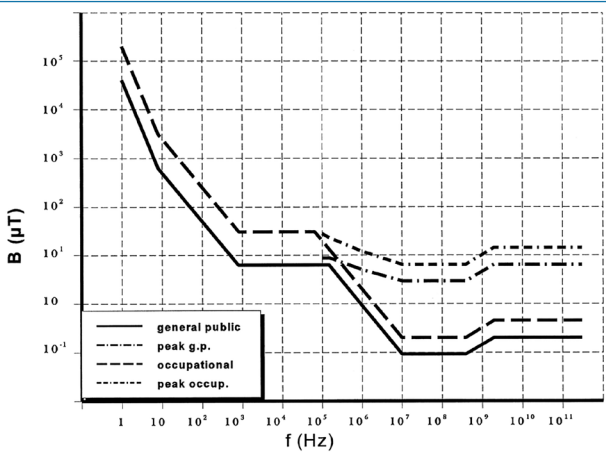


그림 3. 자기장에 대한 노출제한치 (ICNIRP Guidelines 1998)

표 3. IEEE C95.1(2005) 및 IEEE C95.6(2002)의 일반인에 대한 전자파 노출 기준치

| Frequency      | Magnetic Field (A/m)          | Frequency      | Electric Field [V/m]            |
|----------------|-------------------------------|----------------|---------------------------------|
| <0.153 Hz      | $9.39 \times 10^4$            | 1 ~ 368 Hz     | 5,000                           |
| 0.153 ~ 20 Hz  | $1.44 \times 10^4/f$          |                |                                 |
| 20 ~ 759 Hz    | 719                           | 368 ~ 3,000 Hz | $1.84 \times 10^6/f(\text{Hz})$ |
| 759 ~ 3,000 Hz | $5.47 \times 10^5/f$          |                |                                 |
| 3 ~ 3.35 kHz   | $547/f(\text{kHz})$           | 3 ~ 3.35 kHz   | 614                             |
| 3.35 ~ 100 kHz | 163                           | 3.35 ~ 100 kHz | 614                             |
| 0.1 ~ 1.34 MHz | $16.3/f(\text{MHz})$          | 0.1 ~ 1.34 MHz | 614                             |
| 1.34 ~ 3 MHz   | $16.3/f(\text{MHz})$          | 1.34 ~ 3 MHz   | $823.8/f$                       |
| 3 ~ 30 MHz     | $16.3/f(\text{MHz})$          | 3 ~ 30 MHz     | $823.8/f$                       |
| 30 ~ 100 MHz   | $158.3/f(\text{MHz})^{1.668}$ | 30 ~ 100 MHz   | 27.5                            |
| 100 ~ 400 MHz  | 0.0729                        | 100 ~ 400 MHz  | 27.5                            |

표 4. 각 국의 SAR 기준치

| Division                  | ICNIRP              | IEEE                      | USA                                | JAPAN                     |
|---------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| Frequency [Hz]            | $10^5 \sim 10^{10}$ | $10^5 \sim 3 \times 10^9$ | $3 \times 10^5 \sim 6 \times 10^9$ | $10^5 \sim 3 \times 10^9$ |
| Whole body average [W/kg] | 0.08                | 0.08                      | 0.08                               | 0.08                      |
| Section                   | Limb [W/kg]         | 4                         | 4                                  | 4                         |
|                           | Head [W/kg]         | 2                         | 1.6                                | 2                         |
|                           | Body [W/kg]         | 2                         | 1.6                                | 2                         |
| Tissue mass [g]           | 10                  | 10                        | 1 (head, body)<br>10 (limb)        | 10                        |

## 2. 국내의 전자파 인체보호기준

전자파에 대한 국내의 인체보호기준은 ICNIRP Guidelines 1998을 준용하여 사용하고 있으며, 현재 방송통신위원회 고

시 제 2012-2호로 고시되어 있다. 전자파 인체보호기준은 전신노출에 대하여 전자파강도를 제한하고 있으며, 일반인과 직업인으로 분류하여 제한하고 있다. 적용 주파수 범위는 DC ~ 300 GHz 이며, 노출제한치는 <그림 2>와 <그림 3>에 나타난 ICNIRP Guidelines 1998의 기준치와 동일하다. 국부 노출에 대한 SAR기준은 <표 5>에 나타내었다. SAR의 경우 ICNIRP의 기준을 따르지 않고 미국의 FCC 기준을 준용하고 있다. SAR 적용주파수 대역은 100 kHz ~ 10 GHz이다. 현재 무선전력전송 시스템의 경우 100 kHz ~ 10 MHz 대역에서 활발하게 연구 개발되고 있으므로, 인체보호기준은 자극작용의 기준이 되는 환경전자기장 세기와, 열 작용의 기준이 되는 SAR을 동시에 만족시켜야 한다.

표 5. 국부노출에 대한 전자파흡수율(SAR) 기준치

| 주파수              | 구분  | 전자파흡수율 기준(W/kg)* |       |    |
|------------------|-----|------------------|-------|----|
|                  |     | 전신               | 머리/몸통 | 사지 |
| 100 kHz ~ 10 GHz | 일반인 | 0.08             | 1.6   | 4  |
|                  | 직업인 | 0.4              | 8     | 20 |

\* 머리/몸통은 사지를 제외한 신체부위를 말하며 이 부분에 대한 전자파 흡수율 기준은 임의 인체조직 1그램에 대하여 평균한 최댓값을, 사지에 대한 전자파 흡수율 기준은 임의 인체 조직 10그램에 대하여 평균한 최댓값을 적용한다.

## III. 128 kHz 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 인체 안전성 평가

### 1. 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 설계 및 환경 전자기장 세기의 인체보호기준치 비교

128 kHz 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 인체 안전성 평가를 위하여 <그림 4>와 같이 설계하고 Ansys의 HFSS를 이용하여 시스템을 시뮬레이션 하고, 설계에 따라서 제작한 후 전자

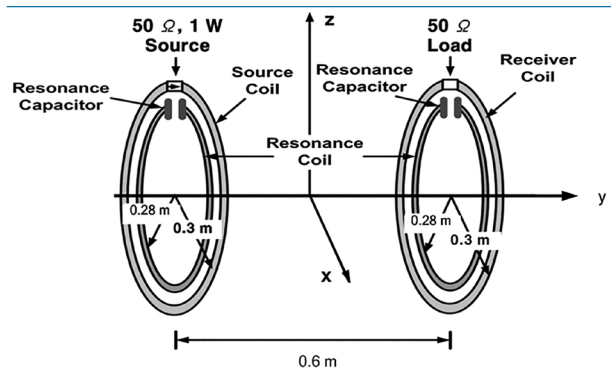
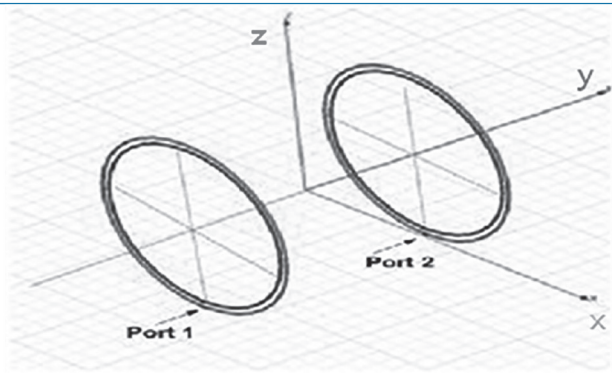
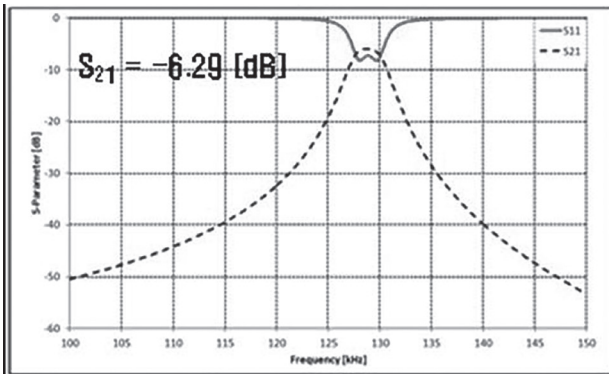


그림 4. 128 kHz 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 회로도

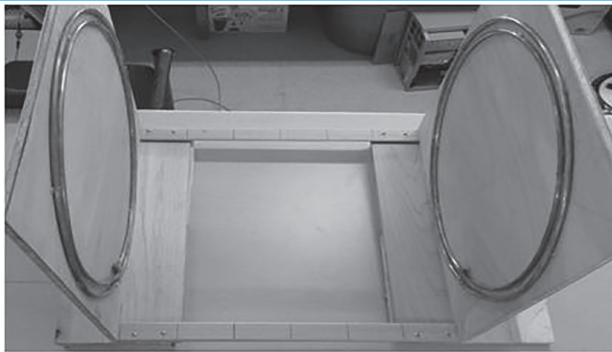


(a) HFSS로 설계한 자기 공진형 무선전력전송 시스템

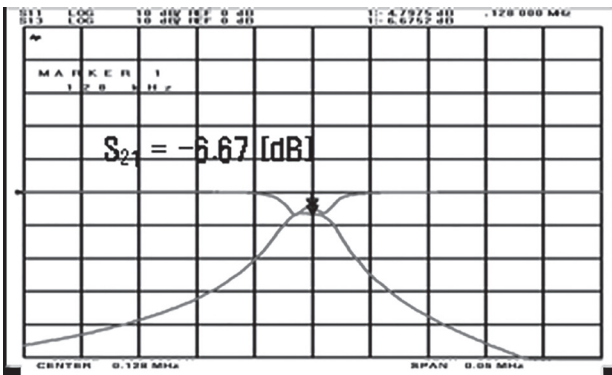


(b) 설계한 자기공명 시스템의 전송 효율

그림 5. 128 kHz 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 설계 결과



(a) 제작한 자기공진형 무선전력전송 시스템



(b) 제작한 자기공명 시스템의 전송 효율

그림 6. 제작한 128 kHz 자기 공진형 무선전력전송 시스템이 측정 결과

기장 세기를 측정하였다. <그림 5>는 HFSS로 설계한 결과이고, <그림 6>은 설계에 따라 제작한 시스템의 결과를 나타낸 것이다. <그림 5>와 <그림 6>에서 확인할 수 있듯이 설계 및 제작한 시스템의 전송 효율이 유사하게 잘 맞는 것을 확인할 수 있다.

<그림 7>은 설계한 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 송수신기 사이에서의 자기장 세기 분포와 측정된 자기장 세기를 인체보호기준치와 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 송신기에 입력된 전력은 1 Watt이다. 송신기에 1 Watt의 전력을 입력했음에도 불구하고, 송신기와 수신기 사이의 자기장 세기는 인체 보호기준치를 초과하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 2010년에 완화된 ICNIRP 기준을 적용하여도 송신기와 수신기 가까이에 서 인체보호기준치를 초과하는 것으로 계산 및 측정되었다.

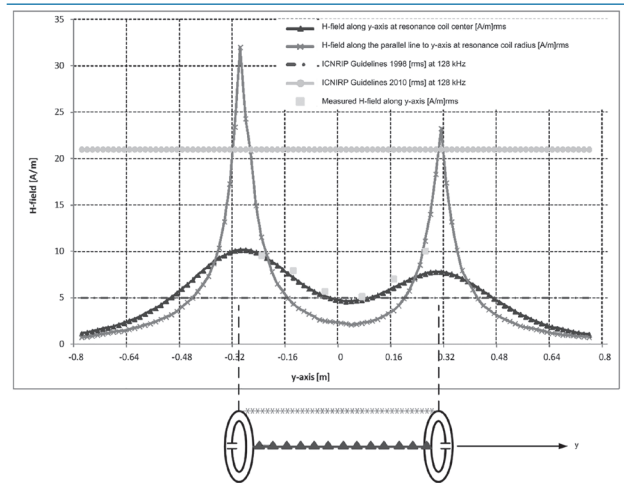


그림 7. 자기 공진형 무선전력전송 시스템 주변의 자기장 세기와 인체 보호기준치와의 비교

## 2. 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 SAR 및 인체 내부의 전기장 세기 계산 및 인체보호기준치와의 비교

자기 공진형 무선전력전송 시스템의 환경 자기장 세기는 1 Watt 송신에도 불구하고 노출제한치(Reference Level)을 초과하는 것을 확인하였다. ICNIRP Guideline에서는 환경 전자기장 세기가 노출제한치를 초과하여도, 기본한계치를 계산하여 초과하지 않으면 인체보호기준치를 만족하는 것으로 간주하고 있다. 따라서 기본한계치(Basic Restriction)을 초과하는지 평가하기 위하여 그림 8과 같이 송신기와 수신기 사이에 단일 모의 인체를 설계하여 위치 시킨 후에 SAR 및 인체 내부의 전기장 세기를 계산하여 인체보호기준치와 비교하였다. 단일 모의 인체는 습피부(Wet-Skin)으로 설정하여 계산하였으며, 128

kHz에서 습피부의 전기적 상수는 <표 6>에 나타내었다[12].

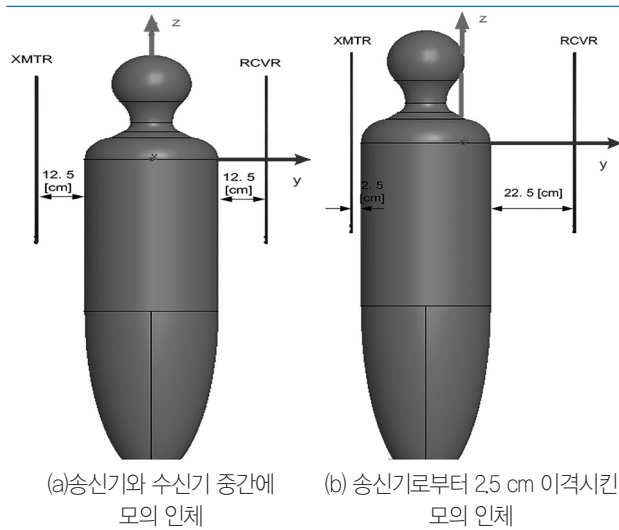


그림 8. SAR 계산을 위한 모의 인체 설치 모습

표 6. 128 kHz에서의 Wet-skin의 전기적 상수

| Frequency | Material | Relative Permittivity ( $\epsilon_r'$ ) | Loss factor ( $\epsilon_r''$ ) | Conductivity (S/m) ( $\omega\epsilon_0\epsilon_r''$ ) |
|-----------|----------|---|--------------------------------|---|
| 128 kHz   | Wet-Skin | 14,434                                  | 10,448                         | 0.0744  |

<그림 9>는 송신기와 수신기 중간에 그리고 <그림 10>은 송신기로부터 2.5 cm 이격시켜 모의 인체를 위치 시킨 후 10 gram SAR 값을 나타낸 것이다.

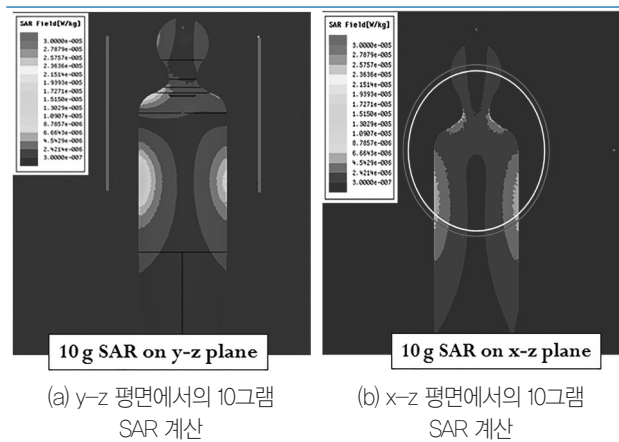


그림 9. 송신기와 수신기 중간에 모의 인체가 놓여 있을 때 SAR 계산 결과

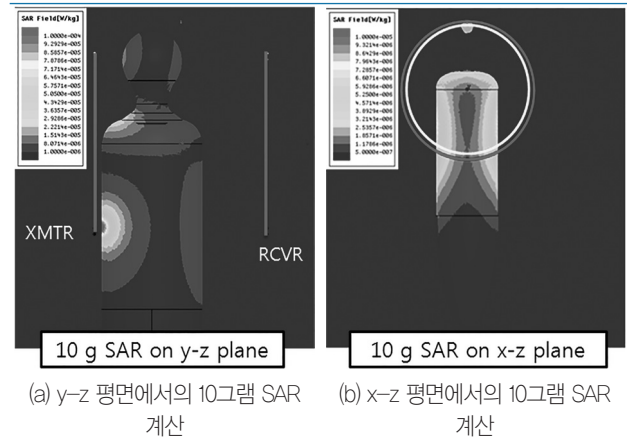


그림 10. 송신기로부터 2.5 cm 떨어트려 모의 인체를 설치하였을 때 SAR 계산 결과

1 Watt 송신기 입력시 10 gram SAR 최대값은  $1.161 \times 10^{-4}$  [W/kg]으로 인체보호기준치 2 W/kg 보다 17,226배 낮은 값이다. 이는 인체보호기준치를 만족하면서 17,226 Watt를 전송할 수 있다는 것이다.

표 7. 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 SAR 계산에 따른 인체보호기준치 비교

| General Public Guidelines of ICNIRP [W/kg]rms | Calculated Spatial Peak 10 g SAR [W/kg]rms | Maximum Possible Input Power below ICNIRP Guideline |
|---|--|---|
| 2   | $1.161 \times 10^{-4}$                     | 17,226 [W]  |

인체 내부의 전기장 세기를 계산하기 위하여 <그림 11>과 같이 송신기와 수신기 사이 중앙에 모의 인체를 위치시킨 후에 전기장 세기의 변화를 계산하였다.

인체내부의 전기장 세기를 계산한 결과 인체 내부의 최대 전기장 세기는 0.43 V/m로 이는 인체보호기준치 17.28 V/m 보다 약 40배 낮은 값이다. 따라서 인체보기준치를 만족하면서 1,600 Watt까지 전송이 가능하다.

표 8. 인체 내부의 전기장 세기와 인체보호기준치와의 비교

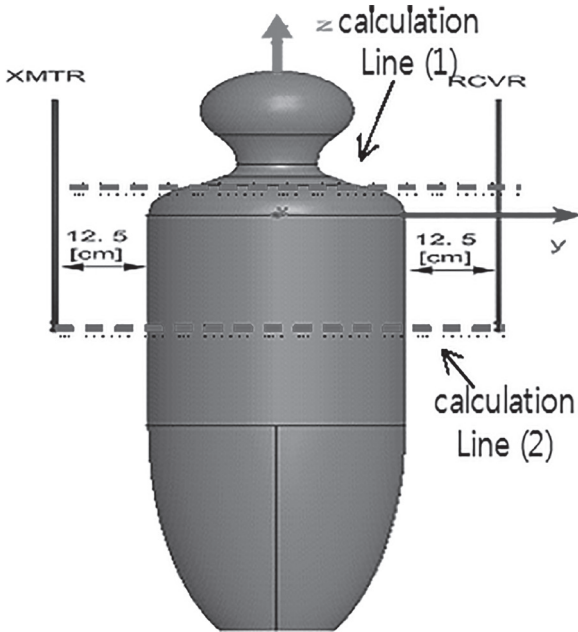
| Basic Restriction of ICNIRP 2010 [Internal E-fields] [V/m]rms | Calculated internal E-field [V/m]rms | Maximum possible input power |
|---|--------------------------------------|------------------------------|
| $1.35 \times 10^{-4}$ (17.28 V/m)                             | 0.43 [V/m]                           | 1.6 [kW]                     |

## IV. 결론

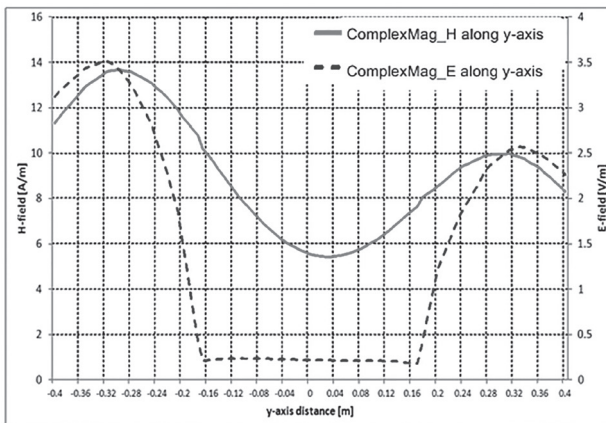
본 고에서는 국내외의 전자파 인체보호기준에 대하여 조사하고, 128 kHz 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 인체 안전성 평가에 대하여 소개하였다. 무선전력전송 기술 중 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 경우, 전기장 보다 자기장 세기가 우세한 시스템으로써 환경 자기장 세기는 1 Watt 입력시 인체보호 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 하지만 실제 인체에 영향을 미치는 인체 내부의 전기장 및 SAR값은 매우 낮게 계산되었다. 따라서 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 인체 안전성 평가는 환경전자기장 세기가 아닌, 인체 내부의 유도전류밀도(인체 내부의 전기장 세기) 또는 SAR로 평가되어야 한다.

## 참고 문헌

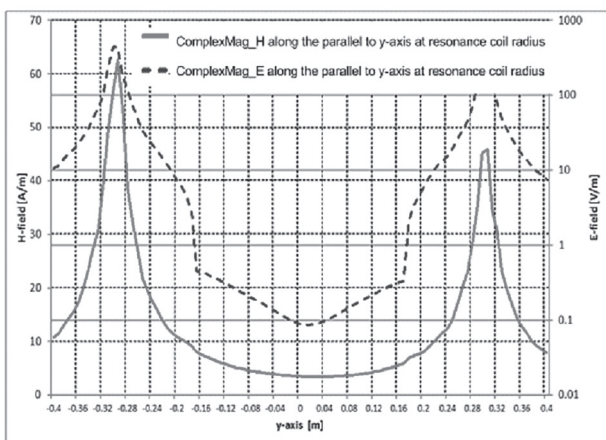
- [1] 마가렛 체니, 니콜라 테슬라-과학문명을 1백년 앞당긴 천재과학자, 도서출판 양문, 1999.
- [2] Homepage of Wireless Power Consortium, <http://www.wirelesspowerconsortium.com>
- [3] M. Soljaic et al., "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, pp. 83-86, June 2007.
- [4] 김진욱, 지현호, 최연규, 윤영현, 김관호, 박영진, "자기 공명 무선 전력 전송 시스템에서 공진코일의 배열에 관한 연구," *한국전자과학회논문지*, 제21권 제6호, Jun, 2010.
- [5] Nancy Wertheimer, ED Leeper, "Electrical wiring configurations and childhood cancer," *Am. J. Epidemiol.* 109(3), pp. 273-284, 1979.
- [6] 김남, "RF 전자파 WHO/IARC 2B 등급 판정과 의미," *한국전자과학회 프로시딩 of 제15회 전자기장의 생체 영향에 대한 워크샵*, Aug. 2011.
- [7] ICNIRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)," *Health Physics* 74 (4): 494-522; 1998.
- [8] ICNIRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)," *Health Physics* 99(6):818-836; 2010.
- [9] IEEE C95.1 ; IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency elec-



(a) 인체내부의 전기장 세기 계산 위치



(b) (a)의 계산라인(1)에서 전자기장 세기



(c) (a)의 계산라인(2)에서 전자기장 세기

그림 11. 인체내부의 전자기장 세기 계산 결과

tromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, 2005.

- [10] IEEE C95.6 ; IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz, 2002.
- [11] 방송통신위원회 고시 제2012-2호, “전자파 인체보호기준”, 2월, 2012년.
- [12] Gabriel, C., Gabriel, S., Courthout, E., “The dielectric properties of biological tissues: I. literature survey,” Phys. Med. Biol., 41(11) pp. 2231-2250, 1996.

## 약 력



주 영 준

2002년 단국대학교 공학사  
2004년 단국대학교 공학석사  
2012년 단국대학교 공학박사  
1997년~2013년 (주)EMF Safety 연구원  
2013년~현재 단국대학교 전자파연구실 연구원  
관심분야: 무선전력전송, 전자파 인체영향,  
EMI/EMC