

## 자기(磁氣)공진형 무선 전력 전송 기술과 전자파 인체 영향

김 윤 명\* · 주 영 준\*\*

\*단국대학교 전자전기공학부 ·

\*\*(주)EMF Safety

### I. 서 론

최근에 Tablet PC와 스마트폰 등 이동통신 단말기의 급속한 보급은 우리의 일상생활에 많은 변화를 가져왔다. 특히 이동통신 단말기기를 이용하여 정보 검색, 게임, TV 시청, 음악 감상 등이 보편화 되면서, 이동통신 단말기를 많이 사용함으로써 배터리가 빨리 소모하게 되어, 단말기 충전을 위하여 충전기를 들고 다니는 불편함이 발생하였다. 유선 충전의 불편함을 해소하기 위해서 최근에 각광 받고 있는 기술이 무선 전력 전송에 의한 이동통신 단말기의 충전 기술이다.

무선 전력 전송 기술은 1897년에 니콜라 테슬라(Nikola Tesla, 1856~1943)에 의해 처음 제안되었으며<sup>[1]</sup>, 그 후 현재까지 여러 가지 무선 전력 전송 기술이 개발되었다. 최근에는 Tablet PC와 스마트폰의 보급으로 인하여 무선 전력 전송에 의한 단말기의 충전에 대한 소비자의 요구가 증가함에 따라, 2008년에 미국의 Fulton사 주도로 WPC(Wireless Power Consortium)가 결성되었다<sup>[2][3]</sup>. WPC는 2010년 6월에 자기(磁氣) 유도 방식에 의한 무선 단말기 충전 표준안(Qi)을 발표하였으며, 현재 Qi 기준을 만족하는 무선 충전 휴대 단말기가 상용화되고 있다. 무선 전력 전송 기술은 전자파를 이용하여 전력을 전달하므로, 전력 전송 시에 반드시 전자파가 발생하게 된다. 미약한 전자파가 인체에 해로운 영향을 준다는 명확한 연구 결과는 없지만, 극저주파 전자계가 소아암의 유병율(誘病率)을 증가시킬 수 있다는 역학 연구 결과로 인하여<sup>[4]</sup>, 전자파의 건강 영향에 대한 국민들의 의구심은 지속

되고 있다. 세계보건기구(WHO) 산하의 국제암연구소(IARC)에서는 2002년에 극저주파(ELF) 자기장을 발암물질 등급-2B(Possibly carcinogenic to humans)로 분류하였고, 2011년 5월에 RF 전자파에 대해서도 발암물질 등급 2B로 분류하였다. 발암물질 등급 2B에 속하는 물질에는 절임식품, 고사리, 커피 등도 포함되어 있다<sup>[5]</sup>.

본 기고에서는 무선 전력 전송 기술과 전자파 인체 보호 기준 그리고 128 kHz 자기(磁氣) 공진형 무선 전력 전송 시스템의 설계와 그 인체 영향 평가를 소개한다.

### II. 무선 전력 전송 기술의 종류

현재까지 제안된 무선 전력 전송 기술은 전송거리 및 전력 전송 방식에 따라 분류될 수 있다. <표 1>은 무선 전력 전송 기술을 전력 전송 방식에 따라 분류하여 나타낸 것이다<sup>[6]</sup>.

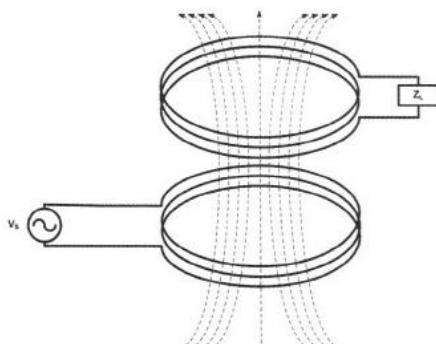
#### 2-1. 자기(磁氣) 유도 결합 방식

자기 유도 결합에 의한 무선 전력 전송은 [그림 1]과 같이 송신 및 수신 코일로 구성되어 있으며, 송신 코일에서 발생된 자기장이 수신 코일에 유도되어 전력을 전달하는 방식이다<sup>[7][8]</sup>. 하지만 송수신 코일의 상대적 위치와 거리에 따라서 전송 효율이 급격하게 감소하는 특성을 가진다.

자기(磁氣) 유도 결합에 의한 무선 전력 전송 기술은 많은 연구가 이루어진 기술로서, 초기에는 의료 기기 분야에서 인공심장에 전력을 전달하기 위한 방

&lt;표 1&gt; 전력 전송 방식에 따른 무선 전력 전송 기술 분류

분류	전송 거리	특징
자기 유도 결합 방식	수 cm 내외	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수 백 kHz 주파수 사용</li> <li>- WPC에서 5 watt 이하의 전력 전송에 대한 표준안(Qi) 확정</li> <li>- WPC에서 150 watt 이하의 전력 전송에 대한 표준안 마련 중</li> </ul>
마이크로파 복사 방식	수 km ~ 수 백 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수 GHz 주파수 사용</li> <li>- 대전력 전송 가능</li> <li>- 인체 영향, 동물 영향 등 환경 문제가 제기됨.</li> </ul>
	수 m ~ 10 m 내외	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수십 MHz ~ 수 GHz 주파수 사용</li> <li>- UHF RFID에서 사용</li> </ul>
자기(磁氣) 공진 방식	수 m 내외	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 100 kHz 이상의 대역에서 적용이 가능함.</li> <li>- 주로 IMS 대역(13.56 MHz)에서 많은 연구가 이루어지고 있음.</li> </ul>



[그림 1] 자기(磁氣) 유도 결합 방식에 의한 무선 전력 전달 장치 개념도

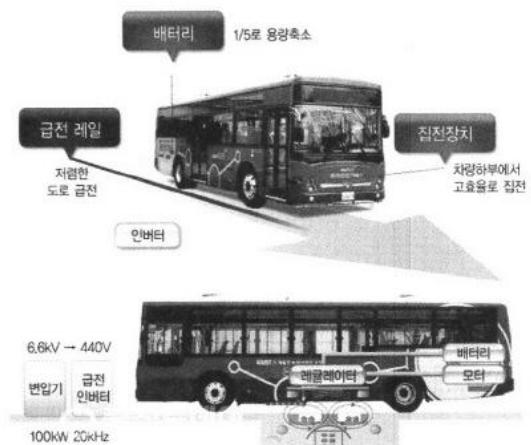
법으로 사용되었다<sup>[9]</sup>. 자기 유도 결합 방식에 의한 휴대폰의 무선 충전과 관련하여 2008년에 WPC(Wireless Power Consortium)가 설립되었고, 2010년 6월에 무선 단말기 충전과 관련된 표준안(Qi)이 발표되었다<sup>[2]</sup>. 무선 충전 표준을 만족하면서 핸드폰이나 PDA, MP3 플레이어, 노트북 컴퓨터까지 충전할 수 있는 자기(磁氣) 유도형 무선 충전 시스템이 개발되어 출

시되고 있다. 그 중 대표적인 제품은 [그림 2]에 나타낸 Duracell Powermat사의 Powermat이다.

자기유도 방식을 이용한 무선 충전 방식의 다른 한 가지의 적용 분야는 전기자동차 분야로서, 국내의 KAIST에서 개발한 온라인 전기자동차(OLEV, On-Line Electric Vehicle)가 있다<sup>[10]</sup>. [그림 3]은 KAIST에서 개발한 OLEV의 개념도를 나타낸 것이다<sup>[10]</sup>. 현재는 온라인 전기자동차의 무선 전력 전송 방식을 전기 철도에 적용하려는 연구가 철도기술연구원과 공동으로 진행되고 있다.



[그림 2] Duracell Powermat 社의 무선 충전 시스템(Powermat)



[그림 3] KAIST에서 개발한 온라인 전기 자동차 개념도

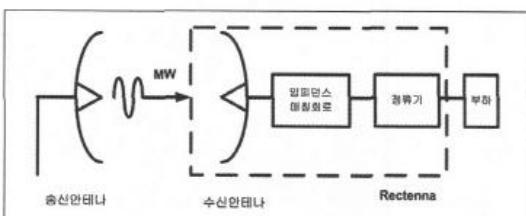
## 2-2 마이크로파 복사(輻射) 방식

마이크로파 복사에 의한 무선 전력 전송 기술은 [그림 4]와 같이 송신기가 복사한 마이크로파(수 MHz~수GHz) 에너지를 수신 안테나가 수신한 후 정류기로 정류하여 부하에 전력을 전달하는 기술이다<sup>[11]</sup>.

마이크로파 복사에 의한 무선 전력 전송 방식은 전송거리에 따라서 원거리 전력 전송 방식과 근거리 전력 전송 방식으로 나눌 수 있다. 원거리 전력 전송 방식은 전송 거리가 수 km~수백 km 내외에서 대전력을 전송하는 기술이며, 대표적인 응용에는 우주 태양광 발전(SPS, Solar Power Satellite)이 있다. SPS는 태양 전지를 장착한 위성을 정지 궤도 위성에 쏘아 올려 성층권에서 생산한 전력을 2.45 GHz 또는 5 GHz의 주파수로 변환하여 사막에 설치된 배열 안테나(array antenna)에 공급하는 방식이다. 이 방식은 전력 전송 효율이 낮다는 것과 고주파 전력 전송 통로 속의 생명체에 영향을 줄 수 있어 송수신 안테나의 범위 내에 생명체의 접근을 통제해야 하는 단점을 가지고 있다. 근거리 전력 전송 방식은 수 m~10 m 내외의 거리에 비교적 작은 전력을 전송하는 방식으로, RFID의 수신 태그(Tag) 등 수 mW의 작은 전력을 필요로 하는 장치에 전력을 전송하는데 많이 사용된다.

## 2-3 자기(磁氣) 공진 방식

자기 공진에 의한 무선 전력 전달 기술은 2007년 MIT 물리학과의 Marin Soljacic 교수 연구팀에서 제



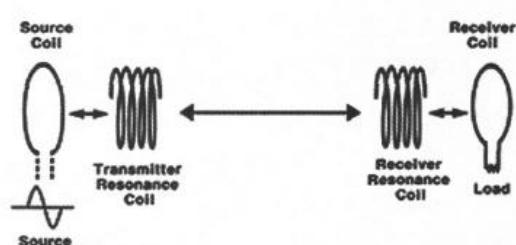
[그림 4] 마이크로파 복사에 의한 무선 전력 전송 개념도

안한 방식으로 기존의 무선 전력 전송 방식과는 다른 새로운 개념의 전송 기술 방식이다. [그림 5]는 자기(磁氣) 공진형 무선 전력 전송의 개념도를 나타낸 것이다<sup>[12][13]</sup>. 자기공진형 무선 전력 전송 기술은 송신기와 수신기에서 같은 공진 주파수를 갖는 송수신 공진 코일과 급전 코일 그리고 부하 코일로 구성되어 있다.

이 방식은 근거리에서 자기(磁氣) 유도 방식보다 높은 전송 효율을 갖는다. 특히, 이 기술은 비(非)복사형(non-radiative)으로서, 같은 공진 주파수를 가진 수신기기가 존재할 때에만 수신기기로 전력이 전송되고, 공진주파수가 맞지 않으면 전력이 전송되지 않는 구조로 되어 있다. 자기공진형 무선 전력 전달 시스템의 사용 주파수는 ISM band 대역인 13.56 MHz 와 6.75 MHz 그외에 수십 kHz~수 백 kHz에서 개발되고 있다.

## III. 전자파 인체 보호 기준

세계보건기구(WHO)에서는 전자파 노출에 대한 인체 안전을 위하여 사전 예방 주의 정책을 권고하고 있다<sup>[14]</sup>. 따라서 각 나라에서는 자국(自國)의 실정에 맞는 전자파 사전 예방 정책을 시행하고 있다. 대표적인 전자파 인체 보호 기준으로는 국제비전리복사방호협회(ICNIRP)의 1998년도 기준과 2010년에 개정한 기준, 그리고 IEEE의 전자파 인체 보호 기준이 있다<sup>[15]~[17]</sup>. 국내의 전자파 인체 보호 기준은 INCIRP



[그림 5] 자기공진형 무선 전력 전달 시스템의 개념도

의 1998년도 기준을 채택하고 있다<sup>[18]</sup>.

### 3-1 국내의 전자파 인체 보호 기준

전자파에 대한 국내의 인체 보호 기준은 ICNIRP에서 1998년에 제정한 전자파 인체 보호 기준을 준용하여 방송통신위원회 고시 제2009-27호로 고시하고 있다<sup>[18]</sup>. 전자파 인체 보호 기준은 전신 노출에 대하여 전자파 강도를 제한하고 있으며, 일반인과 직업인으로 분류하여 제한하고 있다. 적용 주파수 범위는 DC~300 GHz까지이다. 일반인에 대한 기준은 <표 2>에 나타내었다. 국부에 대한 전자파 노출에 대하여는 전자파 비흡수율(SAR, Specific Absorbtion Rate)로 제한하고 있다. <표 3>은 국부 노출에 대한 SAR 기준을 나타낸 것이다<sup>[18]</sup>. 전자파 비흡수율 적용 주파수는 100 kHz~10 GHz이다. 무선 전력 전송에서 사용하는 주파수 대역인 100 kHz~10 MHz 대역에서의 전자파 인체 보호 기준은 전신 노출 기준인 전자파 강도와 국부 노출 기준인 SAR를 동시에 만족하여야 한다.

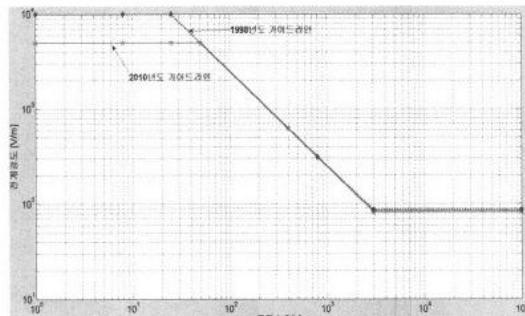
### 3-2 국외의 전자파 인체 보호 기준

국외의 전자파 인체 보호 기준에는 ICNIRP Guidelines 1998(DC~300 GHz), ICNIRP Guidelines 2010

<표 3> 국부 노출에 대한 국내의 전자파 비흡수율(SAR) 기준

주파수 범위	전자파 비흡수율(W/kg) [1 gram 평균]
100 kHz~10 GHz	1.6

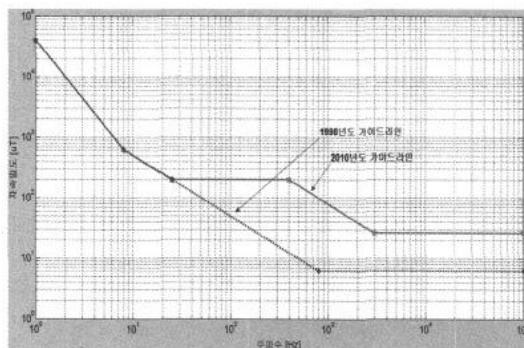
(DC~100 kHz), IEEE Std C95. 1(3 kHz~300 GHz) 등이 있다<sup>[15]~[17]</sup>. [그림 6]과 [그림 7]은 1998년 및 2010년도 ICNIRP의 전기장과 자기장에 대한 인체 보호 기준을 비교하여 나타낸 것이다. 전기장 강도는 50 Hz 이하에서 1998년도보다 낮아졌지만, 50 Hz 이상에서는 기준과 동일한 기준치를 갖는다. 하지만 자기



[그림 6] 전기장의 인체 보호 기준(ICNIRP Guidelines 1998 & 2010)

<표 2> 일반인에 대한 국내의 전자파 강도 기준

주파수 범위	전기장 강도(V/m)	자기장 강도(A/m)	자속 밀도( $\mu$ T)	전력 밀도(W/m <sup>2</sup> )
1 Hz 이하	-	$3.2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	
1 Hz 이상~8 Hz 미만	10,000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	
8 Hz 이상~25 Hz 미만	10,000	$4,000/f$	$5,000/f$	
0.025 kHz 이상~0.8 kHz 미만	$250/f$	$4/f$	$5/f$	
0.8 kHz 이상~3 kHz 미만	$250/f$	5	6.25	
3 kHz 이상~150 kHz 미만	87	5	6.25	
0.15 MHz 이상~1 MHz 미만	87	$0.73/f$	$0.92/f$	
1 MHz 이상~10 MHz 미만	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$	
10 MHz 이상~400 MHz 미만	28	0.073	0.092	2



[그림 7] 자기장 인체 보호 기준(ICNIRP Guidelines 1998 & 2010)

장 강도는 50 Hz에서 2010년도 인체 보호 기준치가 1998년도 기준치보다 2배( $100 \mu\text{T}$ 에서  $200 \mu\text{T}$ ) 완화되었다. IEEE C95. 1 : 2005 인체 보호 기준을 <표 4>에 나타내었다. 그리고 <표 5>는 국외의 SAR 기준치를 나타내었다.

<표 4> IEEE의 일반인에 대한 노출 기준

Frequency range [Hz]	B [mT]	H [A/m]
<0.153	118	$9.35 \times 104$
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

<표 5> 국외의 SAR 기준

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	2	1.6
	Body [W/kg]	2	2	1.6
Averaging tissue mass [g]	10	10	1 (head, body) 10 (limb)	10

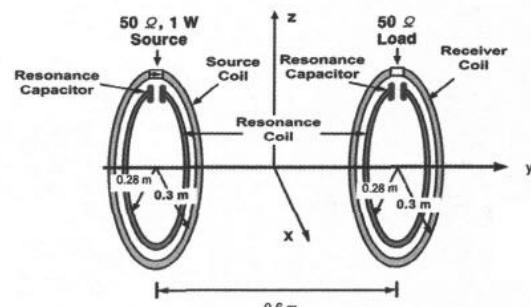
#### IV. 128 kHz 자기공진형 무선 전력 전송 시스템의 인체영향 평가

자기(磁氣) 공진형 무선 전력 전송에서 사용하는 주파수는 ISM band인 13.56 MHz와 6.75 MHz 그리고 수십 kHz~수 백 kHz에서 개발되고 있다.

본 고(稿)에서는 자기(磁氣) 통신에 응용되는 128 kHz 자기공진형 무선 전력 전송 시스템을 설계 제작하여 인체 영향을 평가하였다.

##### 4-1 128 kHz 자기공진형 무선 전력 전송 시스템 설계 및 제작

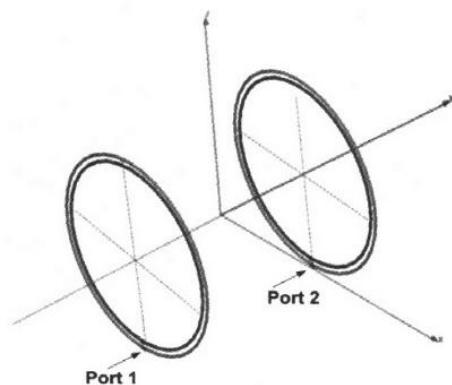
128 kHz 자기공진형 무선 전력 전송 시스템을 [그림 8]과 같이 설계하였다. 수치 해석은 Ansoft의 HFSS



[그림 8] 128 kHz 자기 공진형 무선 전력 전송 시스템 설계도

를 사용하였으며, [그림 9]는 HFSS에서 설계한 모습이다. <표 6>은 128 kHz 자기 공진형 무선 전력 전송 시스템의 설계 파라미터를 나타내었다.

설계 파라미터에서 송수신 공진 코일의 인덕턴스 계산은 식 (1)을 사용하여 계산하였으며<sup>[19]</sup>, 128 kHz 공진을 위한 삽입 커패시턴스는 식 (2)로 계산하였다.



[그림 9] HFSS에서 설계한 128 kHz 자기 공진형 무선 전력 전송 시스템

<표 6> 128 kHz 자기공진형 무선 전력 전송 시스템의 설계 파라미터

파라미터	파라미터 값
급전 코일(부하 코일) 반경	30 cm
송수신 공진 코일 반경	28 cm
급전 코일 밑 공진 코일의 wire 지름	8 mm
급전 및 부하 port impedance	50 Ω
급전 전력	1 watt
공진 주파수	128 kHz
송수신 공진 코일의 inductance [식 (1)에 의한 계산값]	1.53 μH
송수신 공진 코일에의 삽입 capacitance [식 (2)에 의한 계산값]	1.01 μF

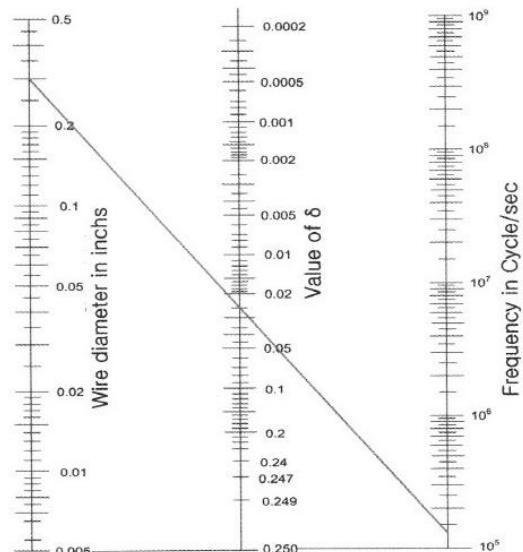
$$L = 0.01595 D \left[ 2.303 \log_{10} \left( \frac{8D}{d} - 2 + \mu\delta \right) \right] [\mu\text{H}] \quad (1)$$

여기서  $D$ 는 코일의 지름(inch),  $d$ 는 wire의 굵기 (inch),  $\delta$ 는 skin effect correction factor,  $\mu$ 는 구리의 투자율이다. [그림 10]은 wire 지름과 주파수에 따른 skin effect correction factor를 나타낸 것이다.

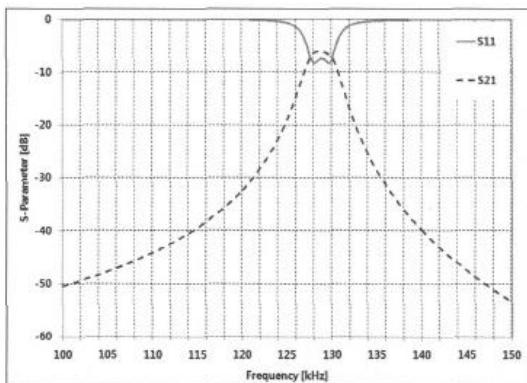
$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \quad (2)$$

[그림 12]는 설계한 128 kHz 자기공진형 무선 전력 전송 시스템의 S-parameter를 나타낸 것이다. 설계한 시스템의  $S_{21} = -6.29$  dB이다.

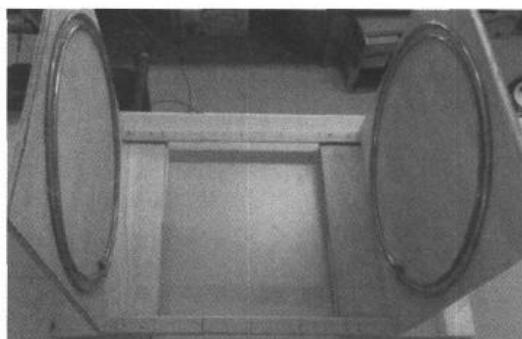
[그림 12]는 설계 조건에 따라서 제작한 자기공진형 무선 전력 전송 시스템의 모습을 나타낸 것이다. 제작된 시스템의 S-parameter 측정 결과를 [그림 13]에 나타내었다. 측정 주파수 범위는 103~153 kHz이고, 세로축 눈금은 10 dB/div이다. 측정된  $S_{21} = -6.67$  dB



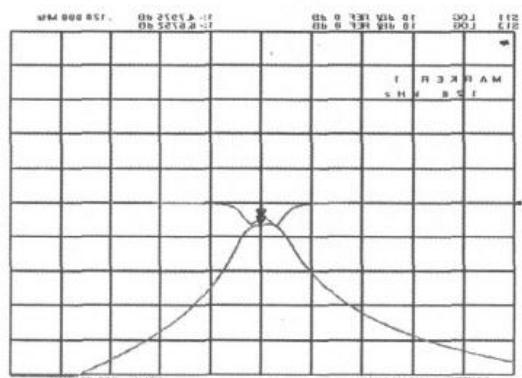
[그림 10] Wire 지름과 주파수에 따른 skin effect correction factor<sup>[19]</sup>



[그림 11] 설계한 128 kHz 자기공진형 무선 전력 전송 시스템의 S-parameter



[그림 12] 제작된 128 kHz 자기공진형 무선 전력 전송 시스템



[그림 13] 제작된 128 kHz 자기공진형 무선 전력 전송 시스템의 측정된 S-parameter

이다. 이는 수치 해석한 결과와 아주 유사한 값을 가짐을 확인할 수 있다.

#### 4-2 128 kHz 자기공진형 무선 전력 전송 시스템 주변의 자기장 세기 계산 및 측정

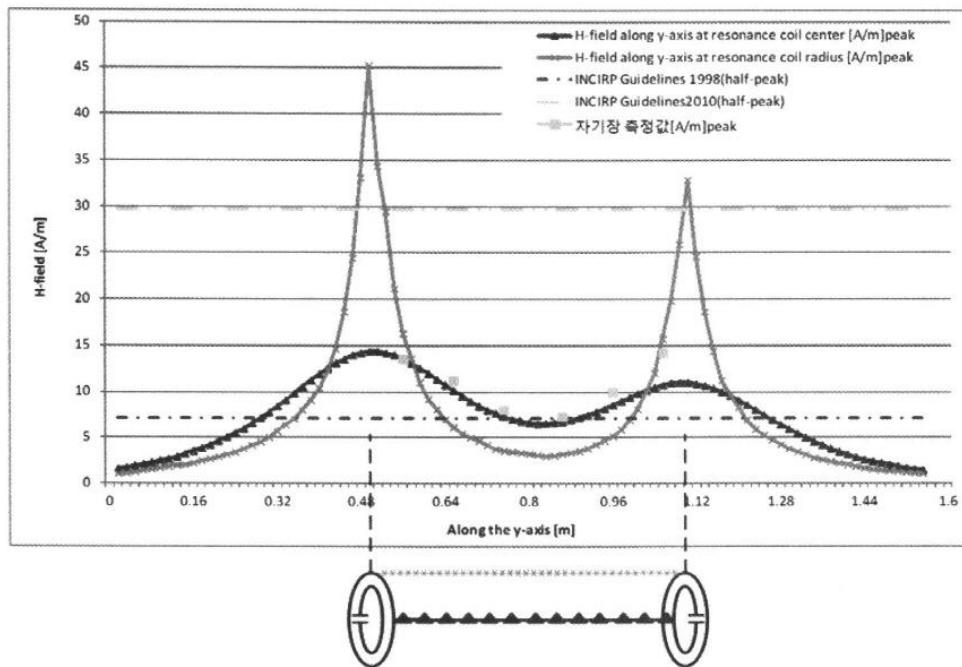
설계된 128 kHz 자기공진형 무선 전력 전송 시스템에 1 watt의 전력을 공급하였을 때, 송수신부 사이에서의 자기장 세기 계산 결과와 측정된 자기장 세기를 인체 보호 기준치와 비교하여 [그림 14]에 나타내었다. 1 watt 송신시 시스템의 송수신기 사이에서의 자기장 세기는 국내의 인체 보호 기준치를 초과하였고, 완화된 ICNIRP Guideline 2010 기준을 적용하여도 송수신부 인접 거리에서는 인체 보호 기준치를 초과하는 것으로 계산되었다.

그리고 제작된 시스템에 1 watt의 전력을 공급하고 자기장 세기를 측정한 결과, 수치 해석 결과와 유사한 값이 측정됨을 확인할 수 있다.

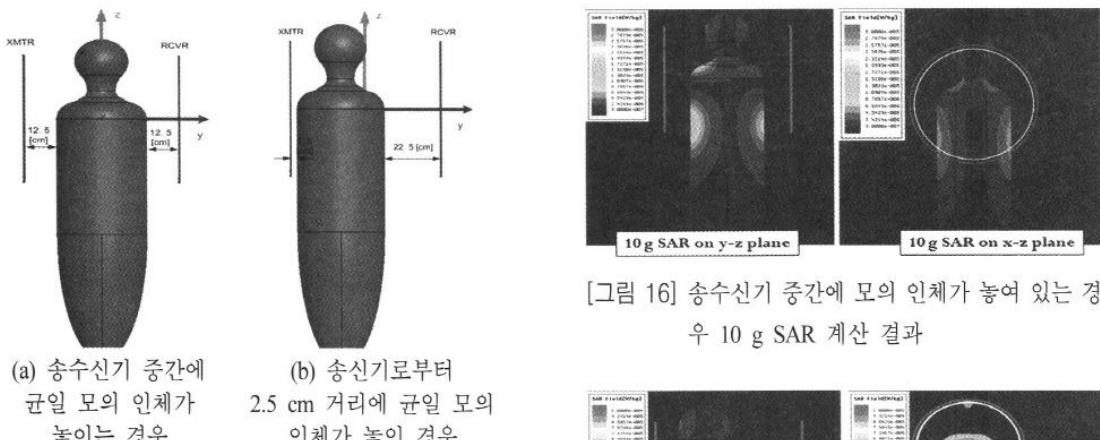
#### 4-3 128 kHz 자기공진형 무선 전력 전송 시스템의 SAR 계산

자기공진형 무선 전력 전송 시스템의 송수신기 사이에 [그림 15]와 같이 단일 모의 인체를 설계하여 위치시킨 후에 송신부에서 1 watt의 전력을 송신할 때 모의 인체에 흡수되는 전자파 흡수율을 수치 해석하였다. 단일 모의 인체는 Wet-skin으로 설정하였다. 128 kHz에서 Wet-skin의 전기적 상수를 <표 7>에 나타내었다<sup>[20]</sup>.

송수신기 사이의 중앙에 모의 인체가 위치하는 경우의 SAR 계산 결과를 [그림 16]에, 그리고 송신기로부터 2.5 cm 떨어진 지점에 모의 인체가 놓여 있는 경우의 SAR 계산 결과를 [그림 17]에 나타내었다. 계산된 10 g 평균 SAR 값의 최대값은 송신기로부터 2.5 cm 떨어진 모의 인체의 복부 부근에서 계산되었다. 계산된 SAR 값과 인체 보호 기준치와의 비교는 <표 8>에 제시되어 있다.



[그림 14] 자기공진형 무선 전력 전송 시스템 주변의 자기장 측정 및 인체 보호 기준과 비교

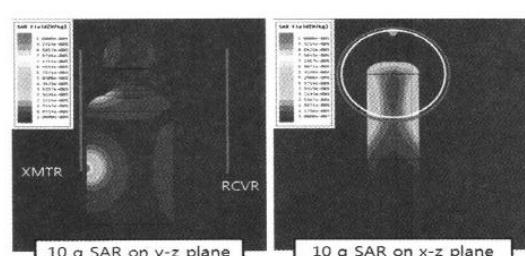


[그림 15] SAR 계산을 위한 송수신기 사이에 모의 인체 위치 모습

<표 7> 128 kHz에서 Wet-skin의 전기적 상수

Tissue name	도전율[S/m]	비유전율[ $\epsilon_r$ ]	Loss tangent
Wet-skin	0.0826	12,883	0.90

[그림 16] 송수신기 중간에 모의 인체가 놓여 있는 경우 10 g SAR 계산 결과



[그림 17] 송신기로부터 2.5 cm 거리에 모의 인체가 놓여 있는 경우 10 g SAR 계산 결과

〈표 8〉 1 watt 입력인 경우에 계산된 SAR과 인체 보호 기준치와 비교

	계산된 SAR [W/kg] <sub>ms</sub>	ICNIRP 일반인 기준 [W/kg] <sub>ms</sub>	공급 가능한 최대 전력
10g SAR	$1.161 \times 10^{-4}$	2	17,226 [W]

## V. 결 론

본 고(稿)에서는 무선 전력 전송 방식과 전자파 인체 보호 기준에 대하여 소개하고, 128 kHz 자기 공진형 무선 전력 전송 시스템을 설계 제작하여 전자파의 인체안전성에 대하여 평가하였다. 100 kHz~10 MHz 대역에서는 전자파 인체 안전을 위하여 환경 전자계와 전자파 비흡수율(SAR)을 동시에 만족하여야 한다. 설계 제작한 자기 공진형 무선 전력 전송 시스템은 60 cm 거리에서 24.2 %의 전력 전송 효율을 나타내었다. 1 watt 송신시 무선 전력 전송 시스템의 송수신기 사이에서 환경 자기장 세기는 국내의 전자파 인체 보호 기준치를 만족하기 어려웠으며, 완화된 ICNIRP Guideline 2010 기준을 적용할 경우 1 watt 송신시 송수신기에 아주 근접한 거리에서 인체 보호 기준치를 초과하였다. 하지만 자기장 세기가 우월한 자기공진형 무선 전력 전송 시스템의 경우, 인체 내부에서 전계 강도가 급격하게 감소한다. 따라서 자기공진형 무선 전력 전송 시스템의 인체 안전성 평가는 환경 자기장 세기가 아닌 전자파 비흡수율을 적용하여야 한다. 128 kHz 자기 공진형 무선 전력 전송 시스템의 송수신기 사이에 단일 모의 인체를 위치시키고 전자파 비흡수율을 계산한 결과, 10 g 평균 최대 SAR값은 인체 보호 기준치 2 [W/kg]에 비하여 매우 낮은 값으로 계산되었다. 자기 공진형 무선 전력 전송 시스템의 인체 보호 기준을 SAR로 적용할 경우 최대 17,226 watt까지 전송 가능한 것으로 계산되었다.

## 참 고 문 헌

[1] Nikola Tesla, "System of transmission of electrical

energy", *Specification Forming Part of Letter Patent*. no. 645,576, 1900.

- [2] Homepage of Wireless Power Consortium, <http://www.wirelesspowerconsortium.com>
- [3] Homepage of Fulton Innovation LLC, <http://ecoupled.com>
- [4] Nancy Wertheimer, E. D. Leeper, "Electrical wiring configurations and childhood cancer", *Am. J. Epidemiol.* 109(3), pp. 273-284, 1979.
- [5] 김남, "RF 전자파 WHO/IARC 2B 등급 판정과 의미", 제15회 전자기장의 생체 영향에 관한 워크샵, 한국전자파학회 프로시딩, 2011년 8월.
- [6] 윤영중, 김정호, 장병준, 안준오, "무선 전력 전달 기술개발 및 표준화동향", 한국전파진흥협회, 2011.
- [7] 김진욱, 손현창, 정승호, 김승균, 김관호, 박영진, "전자기 유도 방식 무선 전력 전송을 위한 다중 템을 갖는 평판형 스파이럴 안테나", 한국전자파학회논문지, 20(8), pp. 753-760, 2009년 8월.
- [8] 서민성, 고영석, 김윤명, 박시홍, "캡슐형 내시경 구동을 위한 무선 에너지 전송", 대한전자공학회 2007년 학술발표대회, 2007년.
- [9] J. C. Schuder, "Powering an artificial heart: Birth of the inductively coupled-radio frequency system in 1960", *Artificial Organs*, vol. 26, no. 11, pp. 909-915, 2002.
- [10] Homepage of OLEV, [www.olev.co.kr](http://www.olev.co.kr)
- [11] Glaser, Peter E. "Power from the sun : its future", *Science Magazine* 162(3856), pp. 857-861, 1968.
- [12] M. Soljacic et al., "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science*, pp. 83-86, Jun. 2007.

- [13] 김진욱, 지현호, 최연규, 윤영현, 김관호, 박영진, "자기 공명 무선 전력 전송 시스템에서 공진 코일의 배열에 관한 연구", 한국전자파학회논문지, 21(6), pp. 564-572, 2010년 6월.
- [14] WHO EMF Projects, [www.who.int/php-emf/en/](http://www.who.int/php-emf/en/)
- [15] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Physics*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
- [16] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)", *Health Physics*, vol. 99, no. 6, pp. 818-836, 2010.
- [17] IEEE Std C95.1, IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, 2005.
- [18] 방송통신위원회 고시 제2009-27호, 전자파 인체 보호 기준, 2009년 11월.
- [19] F. E. Terman, *Radio Engineers Handbook*, London, McGraw-Hill, 1st ed., 1950.
- [20] S. Gabriel, C. Gabriel and E. Courthout, "The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey", *Phys. Med. Biol.*, vol. 41, no. 11, pp. 2231-2250, 1996.

≡ 필자소개 ≡

김 윤 명



1975년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
1977년 2월: 한국과학원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
1977년 3월~1980년 2월: 금성정밀공업

주식회사

1980년 3월~현재: 단국대학교 전자전기공학부 교수  
2000년 6월~현재: (주)EMF Safety 대표이사  
[주 관심분야] 전자파 인체 영향, 전자파 노출량 측정, 무선 전력 전달

주 영 준



2002년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)  
2004년 2월: 단국대학교 전자컴퓨터공학과 (공학석사)  
2012년 8월: 단국대학교 전자컴퓨터공학과 (공학박사)  
2007년 6월~현재: (주)EMF Safety 연구원

[주 관심분야] 전자파 인체 영향, 전자파 노출량 측정, 무선 전력 전달