

무선전력전송 기술과 전자파 인체 영향

주 영 준*

1. 서 론

스마트폰의 급속적인 보급으로 인하여 우리의 일상생활도 급속하게 변화하고 있다. 특히 하루 중 대부분의 시간에 스마트폰을 사용하면서 배터리 소모가 심하게 발생하여, 휴대폰 충전을 위하여 충전기를 들고 다니는 것이 일상화되었다. 무선전력전송 기술은 1897년에 니콜라 테슬라(Nikola Tesla, 1856~1943)에 의해 처음으로 제안되었으며[1], 그 후로 다양한 무선전력전송 기술이 개발되었다. 특히 스마트폰의 보급으로 인하여 무선충전에 대한 소비자의 요구가 증가하였고, 2008년에 미국의 Fulton사 주도로 WPC (Wireless Power Consortium)이 결성되었다[2]. WPC는 2010년 6월에 무선단말기 충전과 관련된 표준안(Qi)을 발표하였으며, Qi를 만족하는 휴대폰 무선충전 시스템이 상용화 되고 있다. 무선전력전송 시스템은 전송 방식에 따라서 자기(磁氣)유도 결합방식, 마이크로파 방사 방식, 자기(磁氣)공진 방식으로 나뉘어진다[3].

무선전력전송 기술은 모두 전자파를 이용하여 전력을 전달하는 것으로 무선전력 전송시에 받드

시 전자파가 발생하게 된다. 미약한 전자파가 인체에 악영향을 준다는 명확한 연구결과는 없지만, 극저주파 전자계가 소아암을 발생시킬 수 있다는 역학 연구 결과로 인하여[4], 전자파의 인체 영향에 대한 불안은 계속되고 있다. 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 humans)로 분류하였고, 2011년 5월에 RF 전자파에 대해서도 발암물질 등급 2B로 분류하였다. 발암물질 등급 2B에 속하는 물질에는 절임식품, 고사리, 커피 등도 포함되어 있다[5-6].

본 기고에서는 무선전력전송 기술과 전자파 인체보호기준 및 무선전력전송 시스템의 인체영향 평가를 위한 측정 방법에 대하여 살펴보았다.

2. 무선전력전송 기술의 종류

무선전력전송 기술은 테슬라의 초기 아이디어와는 다르지만 여러 형태로 개발되어 왔다. 현재까지 제안된 무선전력전송 방식은 무선전력 전송 거리 및 전력전송 방식에 따라 분류 될 수 있다. 표 1은 무선전력전송 전송방식에 따라 분류하여 나타낸 것이다[3].

* 교신저자(Corresponding Author): 주영준, 주소: 경기도 용인시 수지구 죽전로 152 (448-701), 전화: 031)8005-3641, FAX: 031)889-4199, E-mail :kusa@dku.edu

* 단국대학교 전자컴퓨터공학과 연구원

표 1. 전력전송 방식에 따른 무선전력전송 기술 분류

분 류	전송 거리	특 징
자기유도 결합방식	수 cm 내외	- 수 백 kHz 주파수 사용 - 5 watt 이하에 전력전송에 대한 표준안(Qi) 확정 (WPC, Wireless Power Consortium) - WPC에서 150 watt 이하의 전력전송에 대한 표준안 마련 중
마이크로파 방사 방식	수 km~ 수 백 km	- 수 GHz 주파수 사용 - 대전력 전송 가능 - 인체 영향, 동물 영향 등 환경 문제가 제기됨.
	수 m~ 10 m 내외	- 수십 MHz~수 GHz 주파수 사용 - UHF RFID에서 사용
자기(磁氣) 공진 방식	수 m 내외	- 100 kHz 이상의 대역에서 적용이 가능함. - 주로 IMS 대역(13.56 MHz)에서 많은 연구가 이루어지고 있음.

2.1 자기(磁氣) 유도 결합 방식

자기 유도 결합에 의한 무선전력전송은 그림 1과 같이 송신 코일과 수신코일로 구성되어 있으며, 송신 코일에서 발생된 자기장이 수신코일에 유도되어 전력을 전달하는 방식이다[7]. 하지만 두 코일의 상대적 위치와 거리에 따라서 전송 효율이 급격하게 감소하는 특성을 나타낸다. 자기 유도에 의한 무선전력전송 방식은 수 cm 의 거리에서 전력전송이 이루어지기 때문에 비접촉형 무선전력전송이라고 부른다.

자기(磁氣) 유도 결합에 의한 무선전력전송 기술은 현재까지 가장 많은 연구가 이루어진 분야이다. 특히 의료기기 분야에서 인공심장에 전력을

전달하거나, 캡슐형 내시경의 전력을 공급하기 위한 방법으로 사용되었다[8]. 자기 유도 결합 방식에 의한 휴대폰의 무선충전과 관련하여 2008년에 WPC(Wireless Power Consortium)가 설립되었고, 2010년 6월에 무선단말기 충전과 관련된 표준안(Qi)을 발표하였다[3]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 2에 나타낸 Duracell Powermat사의 Powermat이다. 위 제품은 최대 3대의 휴대폰을 동시에 충전이 가능하다. 국내의 경우 LG전선에서 아이폰4용 무선 충전기 차버(Chaver)

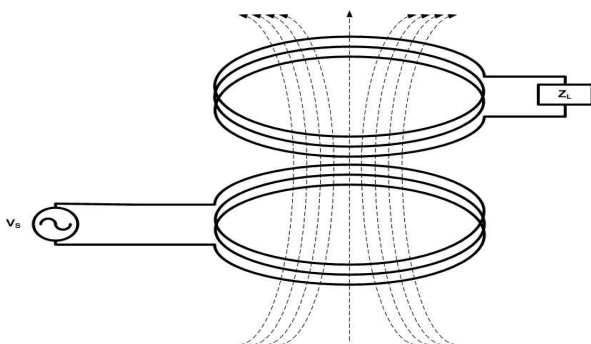


그림 1. 자기(磁氣) 유도 결합 방식에 의한 무선전력전달 장치 개념도



그림 2. Duracell Powermat사의 무선충전 시스템 (Powermat)

(그림 3)를 2011년 7월 자체 기술로 개발하였고, 한림포스텍은 스마트폰용 무선충전 시스템 (SPACON, 그림 4)을 개발하여 상용화하였다. LG전자와 삼성전자도 자기 유도방식으로 충전 가능한 무선충전시스템을 개발하여 상용화 단계에 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 5는 KAIST에서 개발한 OLEV의 개념도를 나타낸 것이다. 온라인 전기자동차는 20 kHz 주파수를 사용하고, 20 kW의 전력을 20 cm거리에서 80 %의 전송효율로 전송할 수 있다[9]. 현재 온라인 전기자동차의 무선전력전송 방식을 전기철도에 적용하려는 연구가 철도기술연구원에서 진행되고 있다.



그림 3. LS전선에서 개발한 무선충전 시스템(차버)



그림 4. 한림포스텍에서 개발한 무선충전 시스템 (SPACON)



그림 5. KAIST에서 개발한 온라인 전기자동차 개념도

2.2 마이크로파 방사 방식

마이크로파 방사에 의한 무선전력전송 기술은 그림 6과 같이 송신기에서 방사한 마이크로파(수 MHz~수 GHz) 에너지를 수신안테나로 수신한 후 정류기로 정류하여 부하에 전력을 전달하는 기술이다[10].

마이크로파 방사에 의한 무선전력전송 방식은 전송거리에 따라서 원거리 전력전송 방식과 근거리 전력전송 방식으로 나눌 수 있다. 원거리 전력전송 방식은 전송 거리가 수 km~수백 km 내외에서 대전력을 전송하는 기술이다. 대표적인 원거리 전력전송 방식에는 우주태양광발전(SPS, Solar Power Satellite)이 있다. SPS는 태양전지를 장착한 위성을 정지궤도위성에 쏘아 올려 우주에서 생산한 전력을 2.45 GHz 또는 5 GHz의 주파

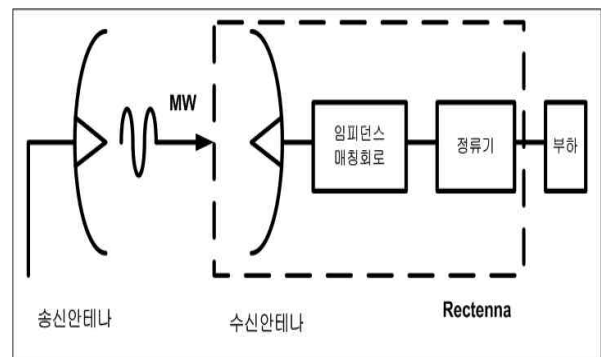


그림 6. 마이크로파 방사에 의한 무선전력전송 개념도

수로 변환하여 사막에 설치된 지상안테나(Array Antenna)에 공급하는 방식이다. 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 범위 내에 생명체가 접근할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 근거리 전력전송 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 무선전력전달 기술은 2007년 MIT 물리학과 Marin Soljacic 교수 연구팀에서 제안한 방식으로 기존의 무선전력 전송방식은 새로운 개념의 전송기술 방식이다. 그림 7은 자기(自己) 공진형 무선전력전송의 개념도를 나타낸 것이다[11]. 자기 공진형 무선전력전송 기술은 송신기와 수신기에서 같은 공진 주파수를 갖는 송·수신 공진코일과 급전코일 그리고 부하코일로 구성되어 있다.

이 방식은 근거리에서 자기(磁氣) 유도방식에 비하여 높은 전송효율을 갖는다. 특히, 이 기술은 비(非)방사형(Non-radiative)으로서, 공진 주파수를 가진 수신기기가 존재할 때에만 수신기기로

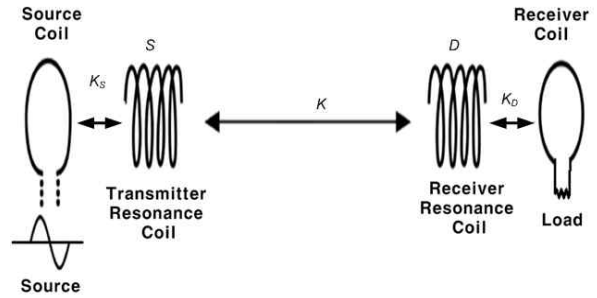


그림 7. 자기공진형 무선전력전달 시스템의 개념도

전력이 전송되고, 공진주파수가 맞지 않으면 전력이 전송되지 않는 구조로 되어있어, 마이크로파 방사 방식과 비교하여 다른 기기나 인체에 영향을 덜 주는 방식으로 알려져 있다.

자기공진형 무선전력전달 시스템의 사용주파수는 ISM band 대역인 13.56 MHz와 6.75 MHz 그리고 수십 kHz~수 백 kHz 대역의 주파수에서 개발하고 있다.



그림 8. MIT의 자기 공진 방식 무선전력전달 장치 시연 모습

3. 전자파 인체보호기준

세계보건기구(WHO, World Health Organization)에서는 전자파 인체 안전에 대한 사전예방주의 정책을 권고하고 있다[39]. 따라서 각 나라에서는 자국의 실정에 맞는 전자파 사전예방정책을 시행하고 있다. 대표적인 전자파 인체보호기준에는 국제비전리복사방호협회 (ICNIRP, Interna-

tional Commission for Non-Ionizing Radiation Protection)의 1998년도 기준과 2010년에 개정된 기준, 그리고 IEEE의 전자파 인체보호기준이 있다. 국내의 전자파 인체보호기준은 INCIRP의 1998년도 기준을 채택하고 있다[13-16].

3.1 국내의 전자파 인체보호기준

전자파에 대한 국내의 인체보호기준은 ICNIRP에서 1998년에 제정한 전자파 인체보호기준을 준

용하여 방송통신위원회 고시 제2009-27호로 고시하고 있다[16]. 전자파 인체보호기준은 전신 노출에 대하여 전자파 강도를 제한하고 있으며 일반인과 직업인으로 분류하여 제한하고 있다. 적용 주파수 범위는 DC~300 GHz 까지 이다. 일반인과 직업인에 대한 기준은 표 2와 표 3에 나타내었다. 국부에 대한 전자파 노출에 대하여는 전자파 비흡수율(SAR, Specific Absorbtion Rate)로 제한하고 있다. 표 4는 국부 노출에 대한 SAR 기준

표 2. 일반인에 대한 전자파강도기준

주파수 범위	전기장강도 (V/m)	자기장강도 (A/m)	자속밀도 (μT)	전력밀도 (W/m ²)
1 Hz 이하	-	3.2×10 ⁴	4×10 ⁴	
1 Hz 이상~8 Hz 미만	10,000	3.2×10 ⁴ /f ²	4×10 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
400 MHz 이상~2,000 MHz 미만	1.375f ^{1/2}	0.0037f ^{1/2}	0.0046f ^{1/2}	f/200
2 GHz 이상~ 300 GHz 미만	61	0.16	0.20	10

표 3. 직업인에 대한 전자파강도기준

주파수 범위	전기장강도 (V/m)	자기장강도 (A/m)	자속밀도 (μT)	전력밀도 (W/m ²)
1 Hz 이하	-	1.63×10 ⁵	2×10 ⁵	
1 Hz 이상~8 Hz 미만	20,000	1.63×10 ⁵ /f ²	2×10 ⁵ /f ²	
8 Hz 이상~ 25 Hz 미만	20,000	2×10 ⁴ /f	2.5×10 ⁴ /f	
0.025 kHz 이상~0.82 kHz 미만	500/f	20/f	25/f	
0.82 kHz 이상~65 kHz 미만	610	24.4	30.7	
0.065 MHz 이상~1 MHz 미만	610	1.6/f	2.0/f	
1 MHz 이상~10 MHz 미만	610/f	1.6/f	2.0/f	
10 MHz 이상~400 MHz 미만	61	0.16	0.2	10
400 MHz 이상~2,000 MHz 미만	3f ^{1/2}	0.008f ^{1/2}	0.01f ^{1/2}	f/40
2 GHz 이상~300 GHz 미만	137	0.36	0.45	50

표 4. 국부노출에 대한 전자파비흡수율(SAR)기준

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

을 나타내었다. 전자파 비흡수율 적용주파수는 100 kHz~10 GHz이다. 무선전력전송에서 사용하는 주파수 대역인 100 kHz~10 MHz 대역에서의 전자파 인체보호기준은 전신노출 기준인 전자파 강도와 국부노출 기준인 SAR를 동시에 만족하여야 한다.

3.2 국외의 전자파 인체보호기준

국외의 전자파 인체보호기준 중 가장 대표적인 인체보호기준은 ICNIRP Guidelines 1998(DC~300 GHz), ICNIRP Guidelines 2010(DC~100 kHz), IEEE Std C95. 1(3 kHz~300 GHz) 등이 있다[13-15]. 그림 9와 그림 10은 1998년도 ICNIRP의 전기장과 자기장에 대한 인체보호기준을 나타낸 것이고, 그림 11과 그림 12는 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 GHz까지의 노

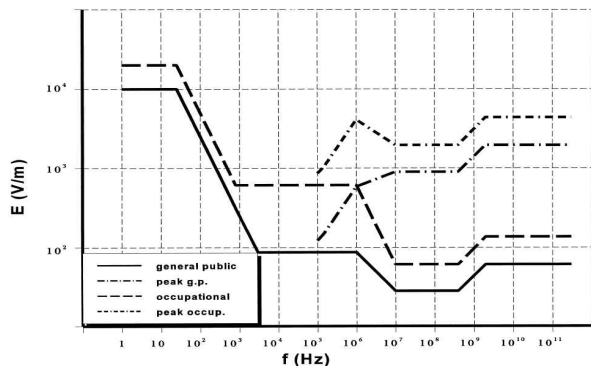


그림 9. 전기장의 인체보호기준 (ICNIRP Guidelines 1998)[13]

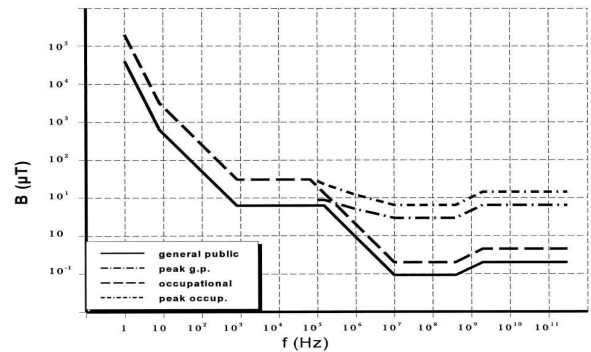


그림 10. 자기장 인체보호기준(ICNIRP Guidelines 1998)[13]

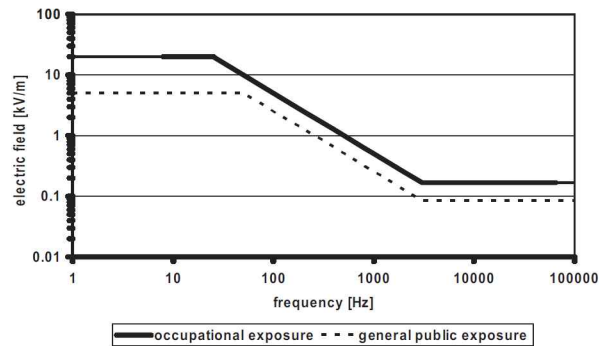


그림 11. 전기장 인체보호기준(ICNIRP Guidelines 2010)[14]

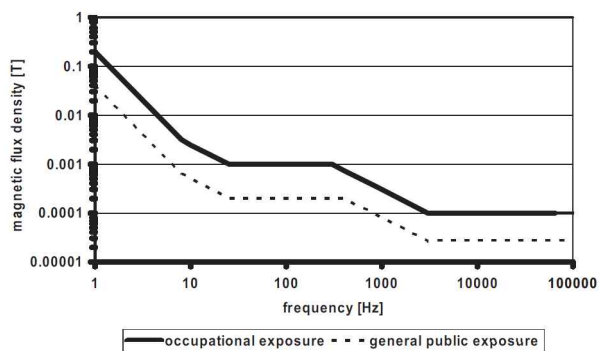


그림 12. 자기장 인체보호기준(ICNIRP Guidelines 2010)[14]

출 제한 기준치이다. 50 Hz 주파수에서 2010년도 기준치는 1998년도보다 2배 (100 μT에서 200 μT) 완화되었다. 국내에서는 2010년도 ICNIRP Guidelines를 인체보호기준으로 변경할 계획을 아직 갖고 있지 않다. IEEE C95. 6 : 2002 인체보호기준

표 5. IEEE의 일반인에 대한 노출 기준[17]

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

은 표 5에 나타내었다[17]. 그리고 표 6는 국외의 SAR 기준치를 나타내었다.

4. 전자파 인체 안전성 측정 방법

무선전력전달 시스템의 인체 안전 평가를 위한 무선전력전달 시스템의 전자파 측정 방법은 현재 까지 국내 및 국제적으로 제정되어 있지 않으며, 측정 방법으로 적용할 수 있는 가장 유사한 기준은 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[18-19].

IEC 62311에서는 전자파의 평가 방법의 종류와 평가절차에 대하여 제안하고 있으며, IEC

62233에서는 전자기파를 발생하는 가정용 전자전 기기에 대한 전자파 측정 방법에 대하여 규정하고 있다.

전자파 인체영향 평가 절차는 그림 13에 나타 내었다.

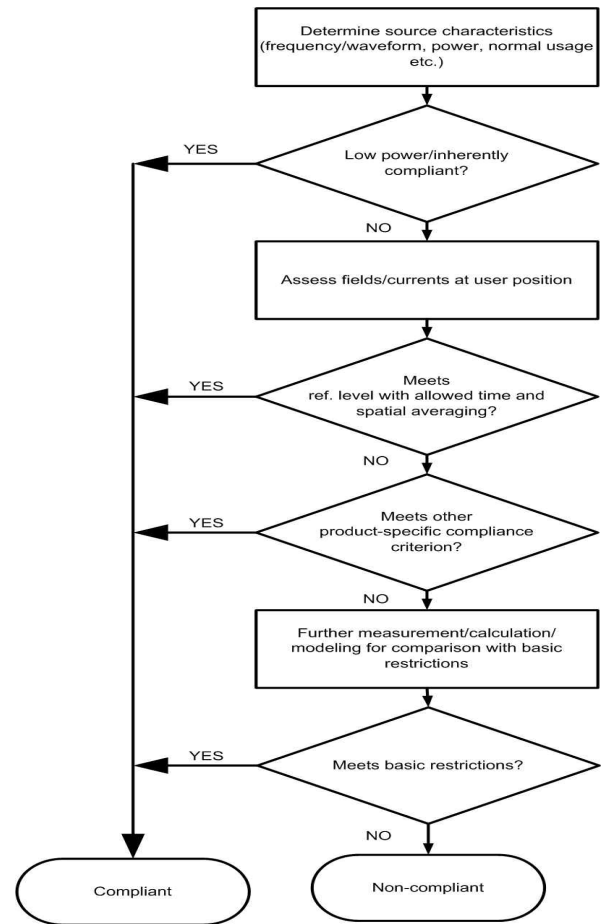


그림 13. 인체 노출 평가 절차

표 6. 국외의 SAR 기준

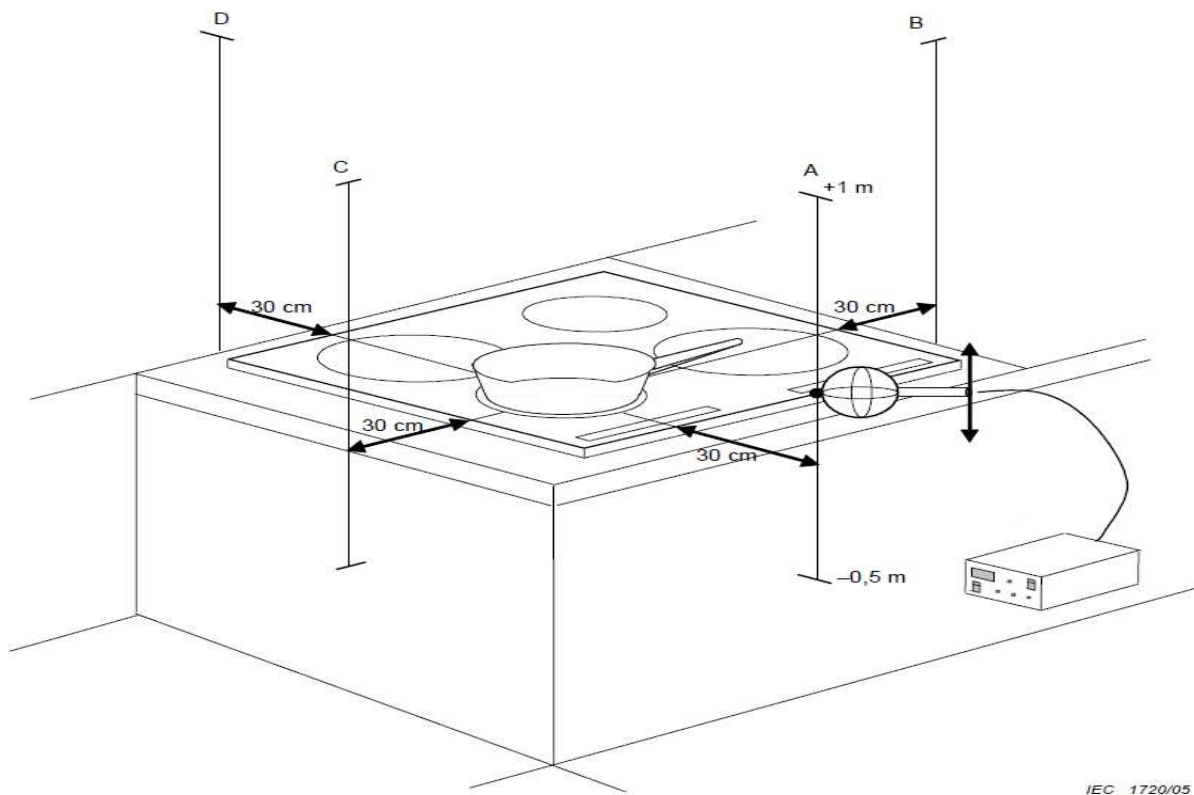
Division		ICNIRP	IEEE	USA	JAPAN
Frequency [Hz]		$10^5 \sim 10^{10}$	$10^5 \sim 3 \times 10^9$	$3 \times 10^5 \sim 6 \times 10^9$	$10^5 \sim 3 \times 10^9$
Whole body average [W/kg]		0.08	0.08	0.08	0.08
Section	Limb [W/kg]	4	4	4	4
	Head [W/kg]	2	2	1.6	2
	Body [W/kg]	2	2	1.6	2
Tissue mass[g]		10	10	1 (head,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

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 평균을 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 측정이격 거리는 0 cm이고, 그 밖의 기기는 30 cm 거리에서 측정하도록 하고 있다. 이때 피시험기기의 동작조건은 전자계 발생량이 최대가 되도록 설정하여야 한다.

유도 전기 레인지는 자기 유도 결합 방식의 무선전력전송 시스템과 가장 유사한 시스템이다. 유도 전기 레인지의 자기장 측정법은 그림 14와 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.

5. 결 론

본 고(稿)에서는 무선전력전송 방식과 전자파 인체 보호기준에 대하여 조사 분석하였다. 또한 가전기기의 주변에서 전자기장 측정 방법과 그 안전 기준을 소개하였다.



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

그림 14. 유도 전기레인지와 열판의 측정 거리

참 고 문 헌

- [1] 임승옥, 강신재, “무선에너지 표준화 동향,” TTA Journal, 129호, pp. 80-85, 2010.
- [2] Homepage of Wireless Power Consortium, <http://www.wirelesspowerconsortium.com>.
- [3] 윤영중, 김정호, 장병준, 안준오, 무선전력전달 기술개발 및 표준화 동향, 한국전파진흥협회, 2011.
- [4] Nancy Wertheimer, ED Leeper, “Electrical wiring configurations and childhood cancer,” *Am. J. Epidemiol.* 109 (3), pp. 273-284. 1979.
- [5] IARC Homepage, www.iarc.fr.
- [6] 김남, “RF 전자파 WHO/IARC 2B 등급 판정과 의미,” 제15회 전자기장의 생체 영향에 대한 워크샵, 2011.
- [7] Frederic P. Miller, Agnes F. Vandome, John McBrewster(Ed.), *Wireless Energy Transfer-Inductive Coupling, Microwave Power Transmission, Electrical Conduction, Thinned Array Curse, Transmission Medium, Distributed Generation, Electircity Distribution, Electric Power Transmission*, alphascript publishing, Mauritius, 2009.
- [8] 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.
- [9] Homepage of OLEV, <http://www.olev.co.kr>
- [10] 윤용식, 최남미, 이호형, 최정수, “우주태양광발전 기술 동향,” 항공우주기술동향, 7권, 2호, pp. 33-39, 2009.
- [11] M. Soljagic et al., “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *Science*, pp. 83-86, June 2007.
- [12] WHO EMF Pojects, www.who.int/php-emf/en/.
- [13] ICNIRP, “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz),” *Health Physics* 74 (4): 494-522; 1998.
- [14] ICNIRP, “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz),” *Health Physics* 99(6): 818-836; 2010.
- [15] IEEE Std C95.1, IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, 1999.
- [16] 방송통신위원회 고시 제2009-27호, “전자파 인체보호기준”, 11월. 2009년.
- [17] IEEE Std C95.6, IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz, 2002.
- [18] IEC 62311-Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz~300 GHz), Aug. 2007.
- [19] IEC 62233-Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure, Oct. 2005.



주 영 준

- 1996년~2002년 단국대학교 전자공학과 학사
- 2002년~2004년 단국대학교 전자컴퓨터공학과 석사
- 2004년~2012년 단국대학교 전자컴퓨터공학과 박사
- 관심분야: 무선전력전송, 전자파 인체영향