

무선 전력 전송 시스템에서의 전자파 연구 동향

김종훈* · 김지성** ·
안승영* · 김정호*

*한국과학기술원 ·
**수원과학대학

I. 서 론

무선 전력 전송 기술의 확산으로 인하여, 우리의 삶의 방식이 점점 변화되고 있다. [그림 1]과 같이 휴대용 모바일 기기를 위한 무선 충전 장치들이 상용화 되고 있으며, 심지어는 [그림 2]에 소개된 것처럼 자동차에도 무선 충전 장치들이 탑재된 자동차가 출시되고 있다. 이렇게 무선으로 신호뿐만 아니라 전력을 전송하게 됨에 따라, 진정한 100 % 무선 전자 기기의 구현이 현실화 되어 우리의 삶은 점점 더 편리해지고 있다.[1],[2]

아직은 수 W에서 수 십 W 정도의 비교적 소비 전력이 작은 제품을 위한 무선 충전 시스템이 상용화되고 있지만, 100 W 이상의 휴대용 모바일 기기를 위한 전력을 무선으로 전송하는 기술도 조만간 상용화 될 것으로 기대된다.



[그림 1] 휴대용 모바일 기기를 위한 무선 충전 시스템 사례

Toyota Avalon, 2013



Jeep Cherokee, 2014



Kia K5, 2015



Lexus NX300h, 2015



[그림 2] 자동차에 적용된 휴대용 기기를 위한 무선 충전 시스템 사례(자료 제공: 이성수(한국과학기술원))

무선 전력 전송 시스템의 성능 및 품질은 모든 사람들이 쉽게 이해할 수 있을 정도로 합리적으로 관리되어야 한다. 무선 전력 전송 장치 또한 하나의 전자 기기이기 때문에, 어

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (No. 2010-0028680).

는 하나 중요하지 않은 성능 지표와 품질 지표는 없겠지만, 그 중에서도 특히 상대적으로 더욱 중요하게 관리되어야 하는 성능 지표 및 품질 지표가 있다.

성능 관점으로는 “부하에 전달되는 전력 및 전압” 값이 중요한 성능 지표라고 할 수 있다. 이 값은 무선 전력 전송 시스템의 정상 동작 여부를 판정하는 기본적인 지표이므로 사용자에게 반드시 제공되어야 한다. 주의할 점은 부하로 전달되는 전력뿐만 아니라, 전압 값도 동시에 제공되어야 한다는 것이다. 일반적인 전자 기기는 정전압원의 형태로 에너지를 제공받고 있기 때문에, 부하에 전달되는 전압 값이 제공되어야 하지만, 만약 정전류원의 형태로 에너지를 제공 받는다면, 당연히 부하에 전달되는 전류 값이 제공되어야 한다.

품질 관점으로 중요한 지표는 “효율”과 “전자파의 세기”라고 할 수 있다. 그 이외에도 역율, 코일(인덕터)을 통하여 흐르는 전류 및 코일 양단의 전압, 공진 현상을 활용하기 위하여, 추가되는 커패시터에 흐르는 전류 및 커패시터 양단의 전압 등 매우 많은 품질 지표가 존재한다. 다양한 품질 변수들에 관한 소개는 다음 장에서 다루어질 것이다.

효율이라고 함은, “유효 전력 전송 효율”을 의미하며, 전력 공급원에서 제공하는 유효 전력과, 부하에 전달되는 유효 전력의 비율로 정의된다. 예를 들면, 220 V 60 Hz 전원 콘센트를 통하여 전달되는 유효 전력과 부하에서의 소비 전력 사이의 비율이 유효 전력 전송 효율이라고 할 수 있다. 유효 전력은 때로 실효 전력이라고 불리기도 한다. 부하로 전달되지 않고, 무선 전력 전송 시스템 내부에서 소비되는 전력으로 인하여, 유효 전력 전송 효율이 낮아지게 되며, 동시에 무선 전력 전송 장치에서 발열 특성이 악화된다. 결과적으로 유효 전력 전송 효율을 높이게 되면, 에너지 절약뿐만 아니라, 발열 특성도 개선되는 것이다.

전자파의 세기는 무선 전력 전송 시스템에서 방사되는 전자파의 세기를 의미한다. 무선으로 에너지를 전송하기 위하여 자기장을 이용하는 경우, 무선 전력 전송 시스템 주위에 강한 자기장이 형성되며, 그 자기장은 무선 전력 전송을 위하여 사용되기도 하지만, 동시에 인체에 영향을 미칠 수도 있고, 주변의 전자 기기에 간섭을 일으켜서 오동작 혹은 성능 저하의 원인이 될 수도 있다. 그러므로 무선 전력 전송

시스템 주변의 전자파의 세기는 중요한 변수로 취급되어 관리되어야 한다.

결과적으로, 무선 전력 전송 시스템의 가장 중요한 3대 주요 지표를 아래와 같이 정리할 수 있으며, 본 글에서는 무선 전력 전송 시스템에 방사되는 전자파에 관한 기술 및 연구 동향을 다룰 것이다.

무선 전력 전송 시스템의 주요 성능 및 품질 지표

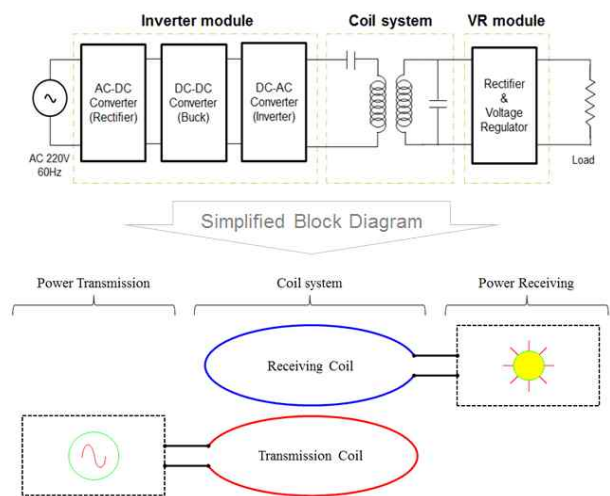
1. 부하에 전달되는 전력 및 전압
2. 유효 전력 전송 효율 (발열)
3. 전자파 노이즈의 세기 (EMF/EMI)

II. 무선 전력 전송 시스템의 구성 및 주요 변수

2-1 무선 전력 전송 시스템의 구성

자기장을 이용하는 무선 전력 전송 시스템은 [그림 3]에서 표현된 것처럼 Power Transmission part, Coil System part, Power Receiving part로 나눌 수 있다. 혹은 TX module, Coil module, RX module로 불리기도 한다.^[3]

Power Transmission part(TX module)은 220 V 60 Hz의 전원 혹은 DC 전압원을, 무선 전력 전송에 유리한 주파수의 전력 형태 변환시켜 주는 부분이고, Power Receiving part(RX module)는 일반적으로 무선으로 전달된 전력의 형태를 DC



[그림 3] Simplified configuration of wireless power transfer system

전압원으로 변환시켜 주는 부분이다. Coil System part는 실제로 에너지가 무선으로 전달되는 무선 전력 전송에 있어서 가장 핵심적인 부분으로 코일 모듈(Coil module)이라고 불리기도 한다.

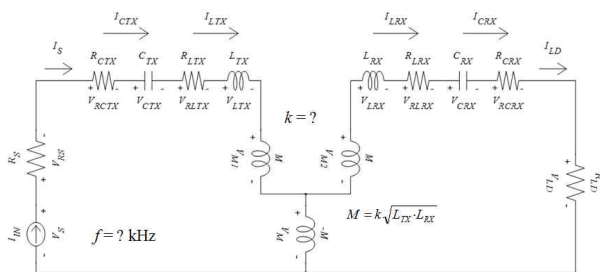
코일 모듈은 [그림 4]와 같이, 등가 회로로 모델링되어질 수 있다. Power Transmission part는 정전류원 혹은 정전압원과 직렬로 연결된 등가의 내부 저항으로 표현되고, Power Receiving part는 등가의 부하 저항으로 표현되어질 수 있다. 코일 모듈은 송전 코일과 수신 코일로 구성되며, 공진 현상을 활용하기 위하여 추가되는 커패시터를 포함한다. 두 코일 사이의 자기장 결합 계수 k 값은 M 으로 표현될 수 있다. 특히 방사되는 전자파의 세기에 영향을 미치는 주요 변수는 송전 코일의 인덕턴스(L_{TX}) 및 전류(I_{LTX}), 수신 코일의 인덕턴스(L_{RX}) 및 전류(I_{LRX})이다.^[3]

2-2 무선 전력 전송 시스템의 주요 설계 변수

무선 전력 전송 시스템의 정상적이고, 신뢰성 높은 동작을 위하여, <표 1>에 정리되어 있는 것처럼 17개의 주요 파라미터들이 설계 단계에서 관찰되어야 한다. <표 2>에 소개된 13개의 설계 변수(design variables) 값이 결정되었을 때, 17개의 주요 파라미터들이 관찰되어야 한다. 또한 허용되는 생산 공정 오차를 고려하여, 13개의 변수들의 허용 범위에 따라, 17 파라미터가 모두 허용 범위 안에 포함되는 지 확인되어야 한다.^[4]

III. 전자파 방사 원리 및 허용 기준

3-1 전자파 방사 원리(RE; Radiated Emission)



[그림 4] Example of an equivalent circuit model for coil module in wireless power transfer system (CSSR topology)

<표 1> Parameters for verification of safety and reliability

Part	17 parameters	Unit	Description
Power source part	Z_{HALL}	Ω	Input impedance at source to TX part
	V_{SRC}	V	Output voltage of source
	I_{SRC}	A	Output current of source
	P_{SRC}	W	Output power of source
	P_F	%	Power factor at source to TX part
TX coil part	V_{LTX}	V	Voltage of TX coil (inductor)
	I_{LTX}	A	Current through TX coil (inductor)
	V_{CTX}	V	Voltage of TX tuning capacitor
	I_{CTX}	A	Current through TX tuning capacitor
RX coil part	V_{LRX}	V	Voltage of RX coil (inductor)
	I_{LRX}	A	Current through RX coil (inductor)
	V_{CRX}	V	Voltage of RX tuning capacitor
	I_{CRX}	A	Current through RX tuning capacitor
Load part	V_{LD}	V	Transferred voltage to load
	I_{LD}	A	Transferred current to load
	P_{LD}	W	Transferred power to load
	E_{FF}	%	Efficiency of real-power transfer

<표 2> Variables for sensitivity simulation

Part	13 variables	Unit	Description
Power source part	F_{REQ}	Hz	Operation frequency
	V_{SRC}	V	Output voltage of source, V^{***} typology
	I_{SRC}	A	Output current of source, C^{***} topology
	R_{SRC}	Ω	Internal resistance of source
TX coil part	L_{TX}	H	TX coil inductance
	C_{TX}	F	TX tuning capacitance
	R_{LTX}	Ω	Internal resistance of TX coil (inductor)
	R_{CTX}	Ω	Internal resistance of TX tuning capacitor
TX~RX	k		Magnetic field coupling coefficient
RX coil part	L_{RX}	H	RX coil inductance
	C_{RX}	F	RX tuning capacitance
	R_{LRX}	Ω	Internal resistance of RX coil (inductor)
	R_{CRX}	Ω	Internal resistance of RX tuning capacitor
Load part	R_{LD}	Ω	Load impedance (resistance)

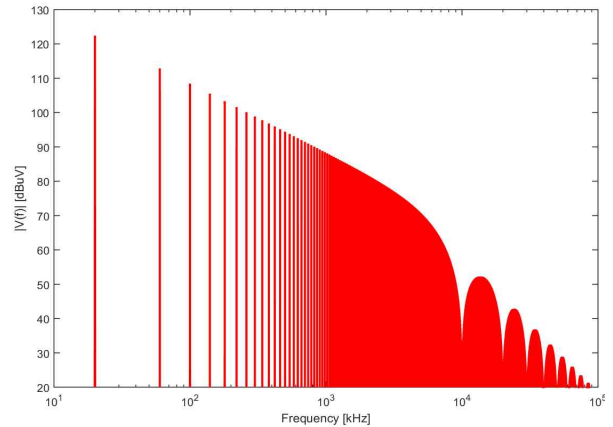
무선 전력 전송 시스템의 구성이 [그림 3]과 같을 때, Power Transmission part의 AC-DC Converter에서부터 Power Receiving part의 Voltage Regulator까지의 모든 부분에서 전자파가 방사될 수 있다. 특히 코일 모듈의 송전 코일(Transmission Coil)과 수전 코일(Receiving Coil)에서 방사되는 전자파에 관한 자세한 분석이 필요하다. 물론 다른 부분에서 방사되는 전자파의 세기를 무시할 수는 없지만, Power Transmission part 및 Power Receiving part의 경우에는 케이스 즉 외함을 완전 차폐(shielding) 함으로써 방사되는 전자파의 세기를 현저하게 축소시킬 수 있지만, 송전 코일과 수전 코일의 경우에는 코일에서 방사되는 자기장을 이용하여 무선으로 전력을 전달하기 때문에, 코일의 주변을 모두 차폐시켜 방사되는 전자파의 세기를 축소시키는 기술을 적용할 수 없다.

송전 코일의 경우, 일반적으로 DC-AC Converter(인버터) 회로를 통하여 출력되는 전압은 Time domain에서 구형파의 모양으로 나타나기 때문에, Frequency domain에서의 전압 스펙트럼은 [그림 5] (a)와 같은 형태로 나타나고, 전류 스펙트럼은 [그림 5] (b)의 형태로 관찰된다. 전류 스펙트럼의 경우, 기저 주파수(Fundamental frequency) 즉 무선 전력전송 주파수 대역에서는 상대적으로 강한 전류가 흐르고, 고조파(Harmonic frequencies) 대역에서는 상대적으로 약한 전류 성분이 존재함을 알 수 있다.

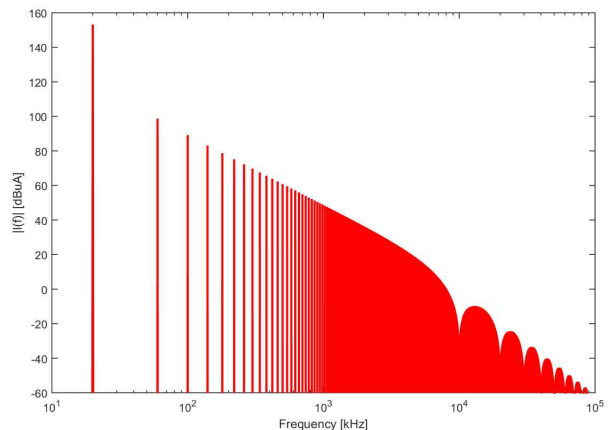
무선 전력 전송 시스템 주변으로 방사되는 전자파, 특히 자기장 성분의 세기는 코일에 흐르는 전류의 세기에 비례하므로, 기저 주파수에서 방사되는 전자파의 세기를 축소시키기 위한 기술 활동은 지속적으로 연구 개발되어야 한다. 부하에 동일한 전력을 전달하려고 할 때, 코일에 흐르는 전류의 세기를 가능한 축소시킴으로써 방사되는 전자파의 세기를 축소시킬 수 있지만, 전류를 0으로 만들 수 없기 때문에 코일에서 방사되는 전자파를 제거할 수는 없다.

코일에 전류가 흐르게 되면, 암페어의 오른손 법칙에 근거하여, 코일 주변에는 [그림 6]에서처럼 자기장이 형성된다. 코일 도선 근처에서 가장 강한 자기장이 형성되고, 코일의 내부에는 강한 자기장이 형성되며, 코일에서 멀어질수록 자기장의 세기가 약해진다.

[그림 6]과 같이, 코일의 직경이 250 mm이고, 코일의 턴수는 14턴이며, 코일에 흐르는 전류가 10 A라는 가정은, 부



(a) Voltage spectrum

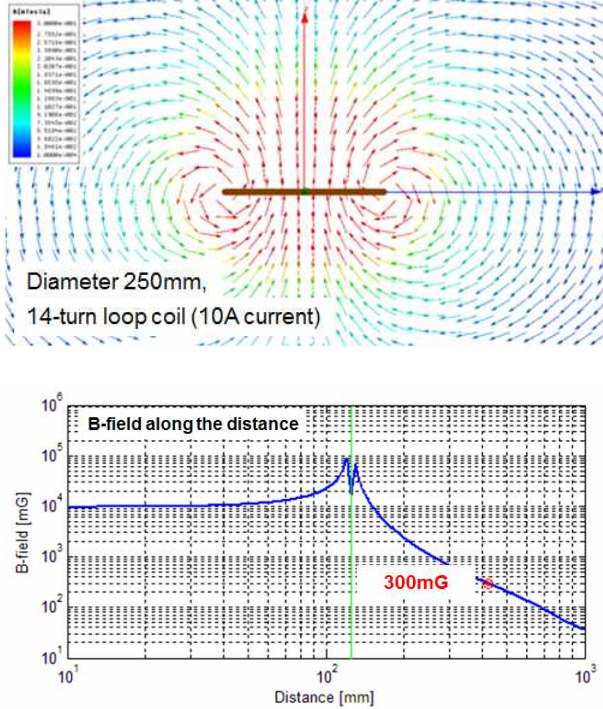


(b) Current spectrum

[그림 5] Spectrum of typical wireless power transfer system

하에 전달되는 전력이 약 300 W 정도(50 W~1 kW 범위)의 무선 전력 전송 시스템과 유사한 조건이다.

이때 코일의 끝에서 300 mm 떨어진 지점에서 (코일의 중심에서 425 mm 거리, 125 mm + 300 mm) 관찰되는 B-field의 세기는 비오-사바르의 법칙을 이용하여 계산하면 약 300 mG 정도가 된다. 코일의 도선 근처에서는 약 10,000 mG 정도의 자기장이 형성될 것이다. 동작 주파수에 따라 다르겠지만, 보통 무선 전력 전송을 위한 동작 주파수가 10 kHz 이상이라고 가정한다면, 이후의 절에서 다루겠지만, 허용 가능한 자기장의 세기는 약 62.5 mG 이므로 코일 주변에서 발생하는 자기장의 세기는 어떤 방법으로도 축소되어야 한다. 이렇게 코일 주변에서의 자기장의 세기를 축소시키기 위한



[그림 6] Magnetic-field distribution around the loop coil

연구 활동이 활발하게 진행되고 있다.^{[5]~[7]}

Biot-Savart's Law

$$dB = \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \right) \cdot \frac{i \cdot dl \cdot \sin\theta}{r^2}$$

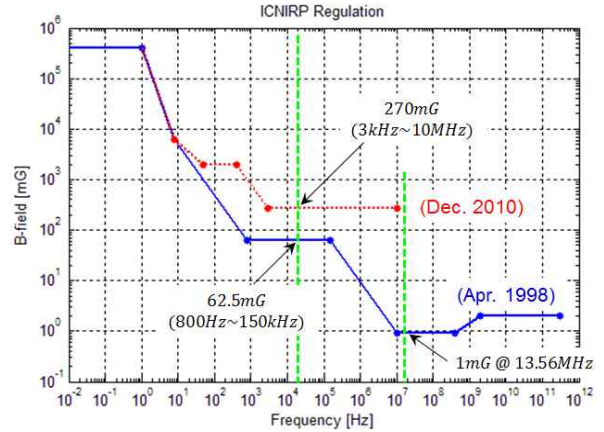
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7 \text{ [T}\cdot\text{m/A]}$$

3-2 전자파 방사 허용 기준(EMF)

무선 전력 전송 시스템을 비롯한 모든 전자 기기에서 방사되는 전자파의 세기는 [그림 7]과 <표 3> 및 <표 4>에 표현된 바와 같이, ICNIRP에서 규정하는 생체 영향을 고려하여 결정된 Guideline을 준수해야 하며, EMF(Electromagnetic field) 노이즈라고 불리며, 특히 기저 주파수 대역에서의 전자파를 의미하는 경우가 많다.

3-3 전자파 방사 허용 기준 -EMI

생체 영향을 고려하여 결정된 ICNIRP Guidelines 뿐만 아



[그림 7] Reference levels for general public exposure to time-varying electric and magnetic fields in ICNIRP guidelines

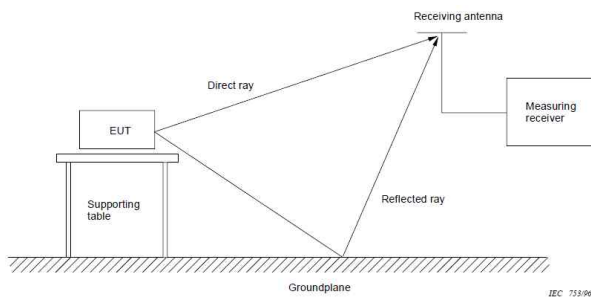
<표 3> Reference levels for general public exposure to time-varying electric and magnetic fields in ICNIRP guidelines in 1998^[8]

Frequency rangy	E-field strength (V m ⁻¹)	H-field strength (A m ⁻¹)	B-field (μT)
Up to 1 Hz	-	3.2×10 ⁴	4×10 ⁴
1~8 Hz	10,000	3.2×10 ⁴ /f ²	4×10 ⁴ /f ²
8~25 Hz	10,000	4,000/f	5,000/f
0.025~0.8 kHz	250/f	4/f	5/f
0.8~3 kHz	250/f	5	6.25
3~150 kHz	87	5	6.25
0.15~1 MHz	87	0.73/f	0.92/f
1~10 MHz	87/f ^{1/2}	0.73/f	0.92/f
10~400 MHz	28	0.073	0.092
400~2,000 MHz	1.375f ^{1/2}	0.0037/f ^{1/2}	0.0046/f ^{1/2}
2~300 GHz	61	0.16	0.20

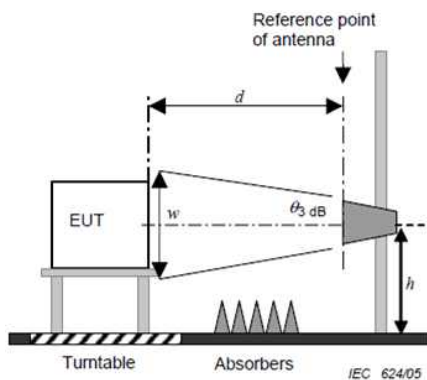
니라, 주위의 전자 기기로의 간섭으로 인한 주변 기기의 성능 저하 현상을 방지하기 위하여, 또 다른 Limitation을 만족하여야 한다. 흔히 EMI 현상이라고 하며, [그림 8] 및 [그림 9]와 같은 CISPR 등의 국제 표준 혹은 각 나라에서 요구하

<丑 4> Reference levels for general public exposure to time-varying electric and magnetic fields in ICNIRP guidelines in 2010^[9]

Frequency rangy	E-field strength E (kV m ⁻¹)	Magnetic field strength H (A m ⁻¹)	Magnetic flux field B (T)
1~8 Hz	5	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^{-2} / f^2$
8~25 Hz	5	$4 \times 10^3 / f$	$5 \times 10^{-3} / f$
25~50 Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
50~400 Hz	$2.5 \times 10^2 / f$	1.6×10^2	2×10^{-4}
400 Hz~3 kHz	$2.5 \times 10^2 / f$	$6.4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
3 kHz~10 MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

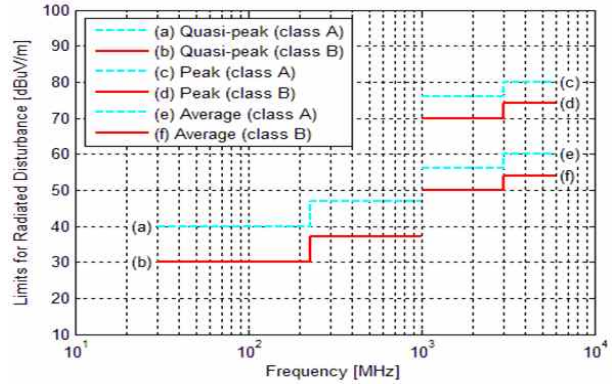


(a) Concept of electric field strength measurements made on an open area test site (OATS) with the direct and reflective rays arriving at the receiving antenna in the frequency range 9 kHz to 1 GHz



(b) Illustration of height scan requirements for the radiated field measurement method above 1 GHz

[그림 8] Limitation of radiated emission from high-speed digital system (Example, CISPR-16-2-3 Ed.2)^[10]



[그림 9] Limits for radiated disturbance in CISPR 22 Ed.5.2, Ch.6^[11]

는 전자파 방사 규정을 준수해야 제품을 상용화 할 수 있게 된다.

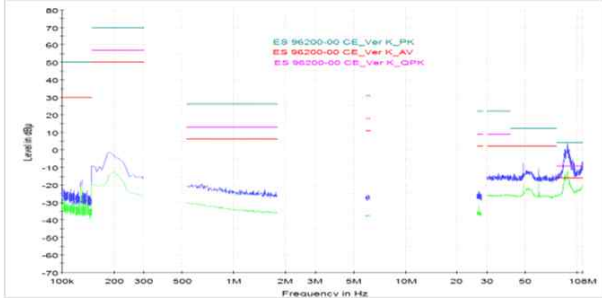
특정한 제품군의 경우, 해당 제품에서 요구하는 전자파 방사(RE; Radiated emission) 규정을 준수하여야 한다. 예를 들어서 [그림 10]과 같은 자동차를 위한 전자파 규정을 만족하는 제품만이 자동차 산업에 적용될 수 있다.

최근 개발되고 있는 무선 전력 전송 시스템의 동작 주파수가 20 kHz에서 110 kHz 등으로 약 100 kHz 부근의 주파수를 활용함에 따라, 특히 AM 라디오 대역에서의 전자기 간섭 현상의 발생 확률이 증가하였다. AM 라디오 대역은 526 kHz에서 1.6 MHz 사이의 주파수에서 각 채널의 대역폭은 9 kHz이다. FM 라디오는 88 MHz에서 108 MHz 사이의 주파수에서 200 kHz의 대역폭으로 운영되고 있다. 텔레비전의 경우에는 54 MHz에서 72 MHz까지, 76 MHz에서 88 MHz까지, 174 MHz에서 216 MHz까지, 470 MHz에서 806 MHz까지의 주파수 영역에서 6 MHz의 대역폭을 갖는다. 아직은 AM 라디오 주파수 영역으로의 간섭되는 현상이 관찰되었지만, 조만간 FM 라디오와 텔레비전 주파수 영역으로 간섭 현상이 나타날 가능성이 매우 높을 것으로 예상된다.

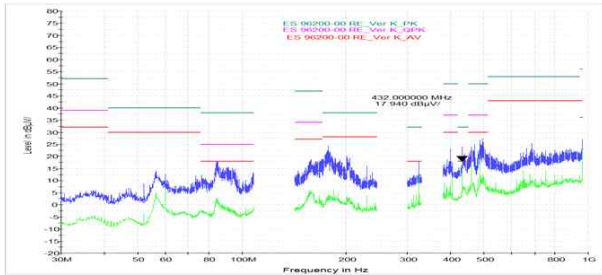
IV. 무선 전력 전송 시스템의 전자파 연구 현황

4-1 무선 전력 전송을 위한 전자파 연구 서막(OLEV)

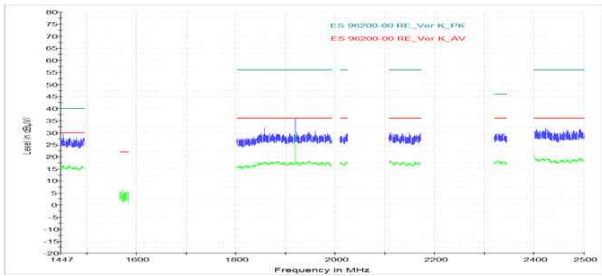
무선 전력 전송 시스템에서 방사되는 전자파 노이즈가 인체 및 주변의 전자 기기에 영향을 미칠 수 있음을 모르고



(a) CE (Conducted emission)



(b) RE (Radiated emission), 1 GHz 이하



(c) RE (Radiated emission), 1 GHz 이상

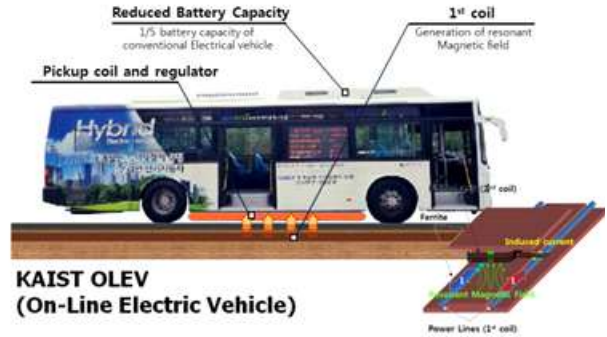
[그림 10] Limitation of radiated emission from electronic devices in vehicle (Example)

있는 것은 아니었지만, 그 심각성이 크게 주목을 받지 못하고 있었다. 무선 전력 전송 시스템에서의 전자파 이슈가 주목을 받은 첫 번째의 사례는 2010년 KAIST OLEV(On-line Electrical Vehicle) 기술이라고 할 수 있다.^[12]

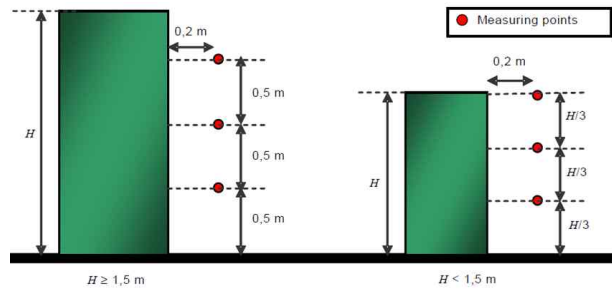
OLEV를 위한 무선 전력 전송 기술은 [그림 11] (a)와 같이, 버스에 200 kW의 대전력을 부하로 전달하기 위하여 20 kHz 주파수에서 200 A 정도의 전류가 흘러서, 앞 절에서 소개된 ICNIRP Guideline을 많이 초과하는 아주 강한 자기장이 코일 주변에 형성되었다. 승객 좌석뿐만 아니라, 버스 옆에서의 자기장의 세기도 ICNIRP Guideline을 만족하지 못하

는 상황이었다. 심지어 버스 옆에서의 전자파 측정 기준이 없었지만, [그림 11] (b)와 같이 합리적인 전자파 평가 기준도 수립하였다.

먼저 승객 좌석에서의 자기장의 세기를 축소시키기 위하여 적용된 기술은 [그림 12]와 같이 전자파 차폐 기술이었다. 수전 코일 상단을 Ferrite로 Magnetic Flux Path를 형성시키고, Metal Shield를 이용하여 전달되는 전자파를 차폐하여,

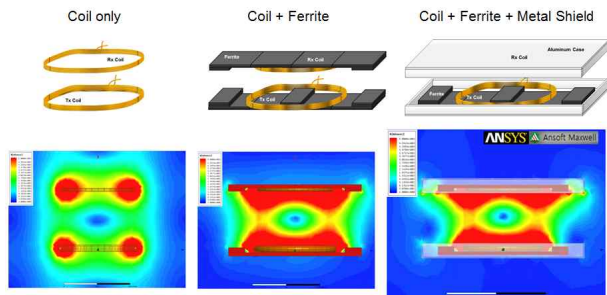


(a) Concept of wireless power transfer technology for OLEV^[12]



(b) Measurement of electromagnetic field^[13]

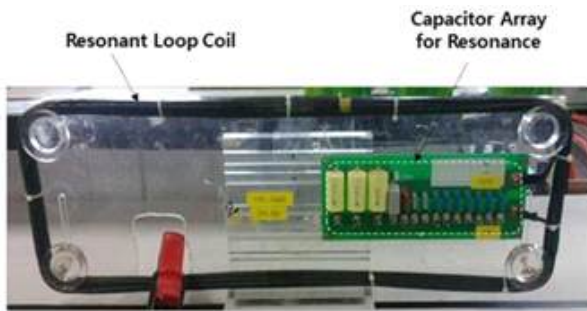
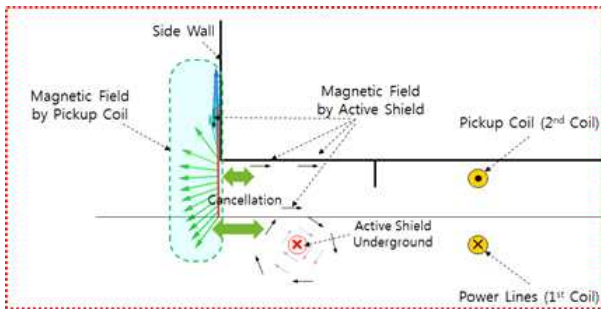
[그림 11] OLEV (On-line electric vehicle) technology



[그림 12] Electromagnetic shielding technology to suppress the electromagnetic field noise for WPT system^[15]

승객 좌석 위치에서의 전자파의 세기를 ICNIRP Guideline을 만족하는 수준 이하로 축소시켰다.

승객 좌석 위치에서의 전자파의 세기를 축소시켰음에도 불구하고, [그림 13] (a)와 같이 버스 옆에서의 전자파의 세기는 ICNIRP Guideline을 만족하지 못하였다. 이렇게 Ferrite 혹은 Metal을 이용하는 차폐 기술을 적용하지 못하는 상황에서 적용된 전자파 축소 기술은 Magnetic-field Cancellation 방법이었다. [그림 13] (b)와 같은 Resonant loop coil을 이용하여 강제로 반대 방향의 자기장을 만들고, 무선 전력 전송 시스템에서 방사되는 자기장에 중첩시켜서, 결과적으로 총 자기장의 세기를 [그림 13] (c)와 같이 축소시켜 ICNIRP Guideline을 만족하게 되었다.^[12]



[그림 13] Magnetic field cancellation technology in OLEV system

4-2 전자파 축소 설계 기술에 관한 연구

앞 절에서 다루어진 전자파 차폐 기술과 Magnetic-field Cancellation 기술 이외에도 무선 전력 전송 시스템에서 발생하는 전자파의 세기를 줄이기 위한 연구 활동은 지속적으로 진행되고 있다. 본 절에서는 아래와 같은 방법으로 무선 전력 전송 시스템에서 방사되는 전자파를 축소 기술 사례를 소개하려고 한다.^{[15],[16]}

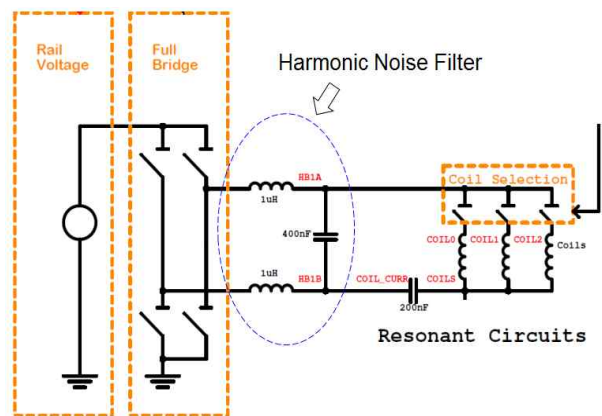
- 무선 전력 전송 시스템에서의 전자파 축소 기술 사례
 1. TX coil current LC filtering 기술
 2. Decoupled inductor 기술
 3. Spread spectrum 기술

4-2-1 TX Coil Current LC Filtering 기술

휴대용 모바일 기기의 무선 충전을 위하여 개발된 Qi standard를 적용한 회로의 예제를 살펴보면, [그림 14]에서 표현된 것과 같은 Harmonic Noise Filter를 확인할 수 있다. Transmission Coil로 전달되는 고조파 성분의 전류 스펙트럼을 축소시키기 위하여 사용된 회로이며, 효과적으로 전자파 노이즈를 축소시킬 수 있다.^[17]

4-2-2 Decoupled Inductor 기술

무선 전력 전송을 위한 동작주파수가 아니라, 고조파 성

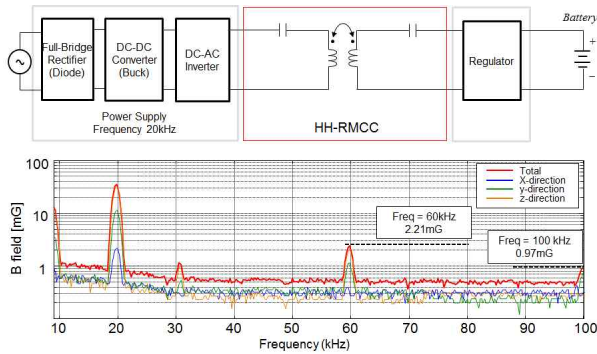


[그림 14] Block diagram of the automotive wireless charger A13 (http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/user_guide/WCT100XAWCAUG_V3.3.pdf)

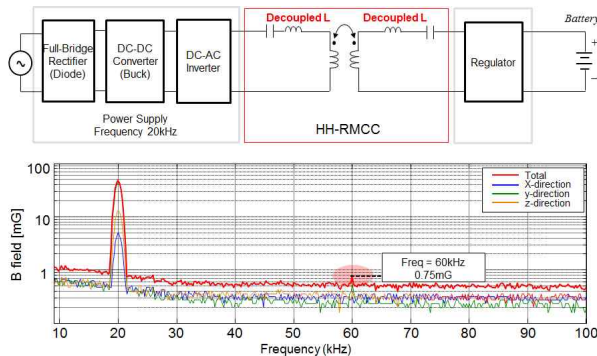
본의 전자파 노이즈 축소를 위하여, Decoupled inductor를 적용하는 기술도 개발되었다. [그림 15] (a)와 같이 일반적인 Series-series resonance 형태의 Coil module에서는 고조파 성분의 전자파 노이즈의 세기가 강하게 발생하지만, [그림 15] (b)와 같이, Coil module에 직렬로 Decoupled inductor를 삽입하게 되면, 방사되는 고조파 전자파의 세기가 현격하게 축소됨을 확인할 수 있다. Decoupled inductor는 앞에서 다룬 LC Filtering 기술과 유사한 기능을 하지만, 회로는 훨씬 간단하게 구성할 수 있다는 장점을 갖는다. 전류의 파형이 정현파 모양과 많이 다른 경우, 효과적으로 고조파 성분을 축소시킬 수 있는 기술이다.^[18]

4-2-3 Spread Spectrum 기술

무선 전력 전송 시스템에서 전자파 노이즈를 축소시킬 수 있는 또 다른 방법은 Spread Spectrum(분산 스펙트럼) 기



(a) Conventional coil module without decoupled inductor

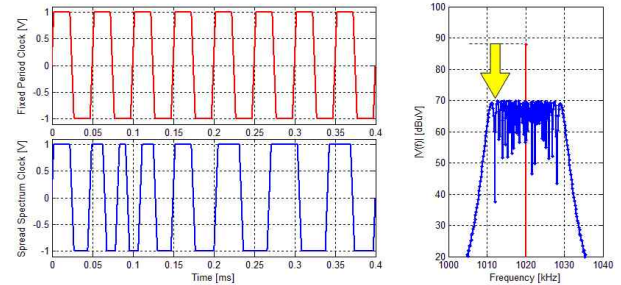


(b) Coil module with decoupled inductor

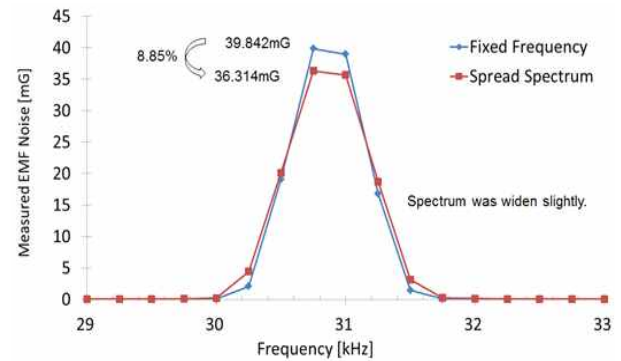
[그림 15] Decoupled inductor to reduce harmonic noise from wireless power transfer system

술을 적용하는 것이다. 무선 전력 전송을 위한 동작 주파수는 일반적으로 변하지 않도록 설계하고 있으나, 동작 주파수를 [그림 16] (a)와 같이 주기 변화를 주면, 기본 동작 주파수뿐만 아니라, 고조파 주파수에서의 전류 스펙트럼이 감소되어, 방사되는 전자파의 세기를 축소시키는 기술이다. 동작 주파수는 30.7 kHz이었고, 분산을 위한 최대 주파수 편차(Frequency peak deviation)는 0.5 %이었으며, 변조 주파수(Mo- dulation frequency)는 10 Hz이었다. 결과적으로 주파수 변화는 30.55 kHz에서 30.85 kHz까지 변화되는 조건이었다. 전자파 노이즈는 기본 동작 주파수에서 약 8.85 % 정도 감소되었다.^[19]

Spread spectrum 기술의 적용에는 상당한 제약이 따른다. 공진을 이용하는 무선 전력 전송 시스템의 특성상 일반적으로 높은 공진의 첨예도(Quality factor; Q-factor) 때문에 주파수의 변화를 계속 증가시키기 어렵다는 단점이 있으나, 하드웨어적으로 어떠한 회로 소자의 추가 없이, 즉 재료비의



(a) Principle of spread spectrum technology



(b) Measured electromagnetic field from WPT system

[그림 16] Spread spectrum technology to suppress the electromagnetic-field from WPT system

증가 없이 소프트웨어만으로도 무선 전력 전송 시스템에서 방사되는 전자파 노이즈를 축소시킬 수 있다는 장점이 있으므로 지속적인 연구 개발 활동이 요구된다.

V. 요약

상용화되는 무선 전력 전송 시스템이 점점 더 증가하고 있다. 휴대폰과 같은 모바일 기기의 무선 충전 기술은 이제 자동차에서까지 상용화 제품의 출시가 되기 시작하였다. 이렇게 무선 전력 전송 시스템의 상용화가 진행됨에 따라, 무선 전력 전송 시스템에서 방사되는 전자파에 관한 일반 시민들의 우려도 증가하고 있으므로, 무선 전력 전송 시스템에서 방사되는 전자파를 축소시키는 기술의 연구 개발은 지속적으로 진행되어야 한다.

가장 먼저 무선 전력 전송 시스템의 구성을 소개하였고, 13개의 설계 입력 변수와 17개의 출력 파라미터를 언급하였다. 전자파 노이즈의 방사 원리 및 허용되는 전자파의 세기에 관하여 소개하면서 ICNIRP guideline과 CISPR standard 예제를 다루었다. 마지막으로 무선 전력 전송 시스템에서 방사되는 전자파의 축소 기술에 관한 연구 개발 사례를 다루었다. Electromagnetic shielding, Magnetic-field cancelation, LC filtering, Decoupled inductor, Spread spectrum 등의 기술을 적용하여 무선 전력 전송 시스템에서 방사되는 전자파 노이즈를 효과적으로 축소시킬 수 있으며, 앞으로도 무선 전력 전송 시스템에서 방사되는 전자파 노이즈를 축소시키기 위한 연구 개발이 지속적으로 진행될 것으로 기대한다.

참고 문헌

[1] C.-S. Wang, H. S. Oskar, and A. C. Grant, "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger", *IEEE Trans. on Industrial Electronics(IE)*, 52(5), pp. 1308-1314, Oct. 2005.

[2] S. Kim, H.-H. Park, J. Kim, J. Kim, and S. Ahn, "Design and analysis of a resonant reactive shield for a wireless power electric vehicle", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques(MTT)*, 62(4), pp. 1057-1066, 2014.

[3] J. Kim, H. Kim, and J. Kim, "Design of wireless power

transfer system considering electromagnetic-field noise", *The Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science(KIEES)*, 23(1), pp. 37-47, Jan. 2012.

[4] J. Kim, J. Kim, H. Kim, C. Song, J. Song, Y. Cho, S. Kim, S. Kong, S. Jeong, and J. Kim, "Safety and reliability verification process of coil module in wireless power transfer system using circuit level sensitivity simulation", *IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems(EDAPS)*, pp. 144-147, Dec. 2015.

[5] J. Kim, H. Kim, I.-M. Kim, Y.-I. Kim, S. Ahn, J. Kim, and J. Kim, "Reduction of electromagnetic field from wireless power transfer using a series-parallel resonance circuit topology", *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science(KIEES)*, 11(3), pp. 166-173, Sep. 2011.

[6] J. Kim, H. Kim, M. Kim, S. Ahn, J. Kim, and J. Kim, "Analysis of EMF noise from the receiving coil topologies for wireless power transfer", *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility(APEMC)*, pp. 645-648, TH-AM-PE2-2, May 2012.

[7] J. Kim, "Design of resonant coil module for wireless power transfer system", *Korea Industrial Technology Association(KOITA) Tech-issue Paper*, 2-3, pp. 5-13, Jul. 2013.

[8] "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (Up to 300 GHz)", *ICNIRP Guidelines*, 1998.

[9] "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)", *ICNIRP Guidelines*, 2010.

[10] IEC CISPR 16-2-3, "Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods-Part 2-3: Methods of measurement of disturbances and immunity-Radiated disturbance measurements, Edition 2", p. 43, p. 89, 2006.

[11] IEC CISPR 22, "Information technology equipment - Radio disturbance characteristics-Limits and methods of measurement, Edition 5.2", pp. 11-14, 2006.

[12] S. Ahn, J. Pak, T. Song, H. Lee, J. Byun, D. Kang, C.-S. Choi, Y. Chun, C. T. Rim, J.-H. Yim, D.-H. Cho, and J.

- Kim, "Low frequency electromagnetic field reduction techniques for the on-line electric vehicle (OLEV)", *IEEE Electromagnetic Compatibility Symposium (EMCS)*, pp. 625-630, Jul. 2010.
- [13] IEC 62110, "Magnetic field levels generated by a.c. power systems-Measurement procedures with regard to public exposure, Edition 1", pp. 12-14, 2009.
- [15] J. Kim, J. Kim, S. Kong, H. Kim, I.-S. Suh, N. P. Suh, D.-H. Cho, J. Kim, and S. Ahn, "Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system", *Proceedings of the IEEE*, 101(6), pp. 1332-1342, Jun. 2013.
- [16] S. Ahn, J. Kim, "Technology trend of EMC for wireless power transfer system", *The Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science(KI-EES)*, 26(1), pp. 5-15, Jan. 2015.
- [17] Freescale Semiconductor, "WCT1001A / WCT1003A Automotive A13 Wireless Charging Application User's Guide Rev. 3.3", p. 7, 2015.
- [18] C. Song, D. H. Jung, E. Song, Y. Cho, S. Kim, J. Kim, and J. Kim, "Electromagnetic interference reduction method from handheld resonant magnetic field charger (HH-RMFC) for electric vehicle", *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, pp. 5-8, May 2014.
- [19] J. Kim, H. Kim, S. Ahn, J. Kim, I.-M. Kim, Y. Kim, and J. Kim, "Spread spectrum technology to reduce the EMI from the constant voltage source type wireless power transfer system", *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, WeB2-2 SE02_1002, Oct. 2011.

≡ 필자소개 ≡

김 증 훈



1995년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
1998년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
2003년 8월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)
2003년 3월~2010년 9월: 삼성전자 메모리사업부 책임연구원

2010년 10월~현재: 한국과학기술원 미래자동차학제전공 연구교수
[주 관심 분야] The Analysis and Design of Wireless Power Transfer (WPT) System, Signal Integrity (SI), Power Integrity (PI), and Electromagnetic Interference / Compatibility (EMI/EMC) of High-speed Digital Systems

김 지 성



2000년: University of Texas at Austin 전자공학 (공학박사)
2000년~2006년: 삼성전자 디지털미디어 총괄수석연구원
2007년~2014년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 연구 부교수
2015년~현재: 수원과학대학교 전자과 교수

[주 관심분야] Signal Integrity, Power Integrity, EMI/EMC, Wireless Power Transfer

안 승 영



1998년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
2005년 8월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)
2001년 4월~2002년 3월: Singapore Institute of

Manufacturing Technology, Visiting Associate Research Fellow
2005년 5월~2009년 8월: 삼성전자 컴퓨터사업부 책임연구원
2009년 9월~2011년 9월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 연구부교수
2011년 10월~현재: 한국과학기술원 조천식 녹색교통대학원 조교수
[주 관심 분야] Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle, High-Speed Digital System Design, Package and Multi-Layer PCB Design, Electromagnetic Interference

김 정 호



1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1986년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1993년 2월: Dept. of Electrical Engineering, The University of Michigan (공학박사)
1994년~1996년: 삼성전자 메모리사업부
1996년~현재: 한국과학기술원 전기및전자공학과 교수

[주 관심 분야] EMC Modeling, Design, and Measurement Methodology of 3D IC, TSV, System-in-Package (SiP), Multi-layer PCB, and Wireless Power Transfer Technology