

전자파 노이즈를 고려한 무선전력전송 기술동향 및 전망

김중훈* · 김지성* · 김홍석** · 송치역** · 안승영*** · 김정호*

* 한국과학기술원, 전기및전자공학과
 ** 한국과학기술원, 미래자동차학제전공
 *** 한국과학기술원, 조천식 녹색교통대학원

목 차

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| I. 서 론 | IV. OLEV 시스템에서의 전자파 현상 |
| II. 무선전력전송 시스템과 전자파 노이즈 | V. 전자파 노이즈 축소 기술 사례 |
| III. 무선전력전송 시스템 사례 분석 | VI. 결 론 |

I. 서 론

현대를 살아가는 사람들의 일상적인 생활양식은 하루가 다르게 변해가고 있다. 무선 통신 기술의 발전과 더불어, 스마트 폰과 같은 고성능 모바일 기기의 등장으로 언제 어디서나 인터넷에 접속하여, 대량의 정보를 실시간으로 주고받으면서 주위의 사람들과 의사소통을 하며 살아가고 있다. 최근 출시를 앞두고 있는 스마트 폰에, 무선전력전송 기술의 적용이 기본 사양으로 채택될 것이라는 보도를 쉽게 접할 수 있듯이, 이제는 무선 데이터 통신을 넘어, 무선 에너지 전달의 대중화를 목전에 두고 있다. 무선 전력 전송 (Wireless Power Transfer, WPT) 기술에 관한 표준화 활동 및 관련 법규의 제정 활동이 활발하게 진행되고 있는 것으로 미루어 짐작하건데, 대부분의 사람들이 쉽게 무선 전력 전송 기능을 가지고 있는 시스템을 사용할 확률이 매우 높다고 할 수 있을 것이다. [3]

최근, 매우 빠른 속도로 무선 전력 전송 기술이 학계 및 산업계의 주목을 받고 있지만, 실제로는 아주 오래 전부터 연구가 진행되고 있는 기술 분야이다. 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이 1904년에 Tesla에 의하여 상당한 연구가 이미 진행되었으며, 한동안 크게 주목 받지 못하다가, 2006년에 그림 1(b)와 같은 MIT 연구 결과가 발표된 후부터 다시 많은 주목을 받고 있다.



(a) Tesla's Tower by Nikola Tesla in 1904 [1]



(b) WPT System from MIT in 2006 [2]

그림 1. 무선전력전송 기술의 선행 사례

II. 무선전력전송 시스템과 전자파 노이즈

최근에 진행되고 있는 무선전력전송 방식을 살펴보면, 근거리 (Near-field) 자기장 혹은 전기장을 이용한 방법과 원거리 (Far-field) 고주파의 전자파를 이용하는 방법 등 다양한 방법의 연구 결과가 발표되고 있으며, 최근에는 근거리 자기장을 이용한 방법에 관한 연구 결과가 많이 발표되고 있다. [4], [5], [6], [8], [9]

근거리 자기장을 (Near Magnetic Field) 이용한 무선전력전송 시스템은 그림 2와 같이, 크게 세 부분으로 (전력 송신부, 코일 시스템, 그리고 전력 수신부) 나누어 분석할 수 있다. [4]

실제로, 전력 전송이 무선으로 이루어지는 가장 핵심적인 부분을 코일 시스템 (Coil System) 부분이라고 하며, 자기장을 이용하여 에너지를 주고받기 위한 송신 코일 (Transmitting Coil) 및 수신 코일 (Receiving Coil) 등으로 구성되어 있다. 전력 전송 효율의 증가뿐만 아니라 무선전력전송 거리를 증가시키기 위해, 공진 현상을 이용하면 유리한 점이 많으므로, 이를 구현하기 위하여 추가하는 커패시터도 이곳에 포함하여 분류한다.

전력 송신부는 (Power Transmission Part) 대체로 일반 가정용 전원인 220V, 60Hz의 전력을 입력 받아, 전력 전송에 유리한 수십 kHz에서 수십 MHz의 전원으로 에너지의 형태를 바꾸어 주는 부분이며, 주로 전력전자 회로로 구성되어 있다. 전력 송신부는 주로 정류기 (Rectifier), 강압 및 승압 컨버터 (Buck or Boost Converter), 그리고, 인버터를 (Inverter) 포함한다.

전력 수신부는 (Power Receiving Part) 고주파 형태의 교류 전력을 직류 형태로 바꾸어 주는 부분이며, 정류기 (Rectifier), 전압 안정화기 (Voltage Regulator) 등을 포함하는 것이 일반적이다.

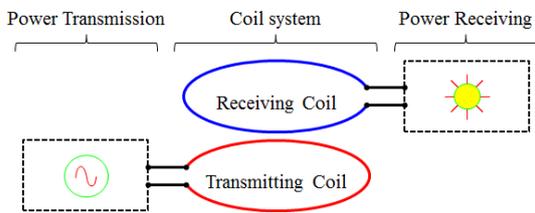
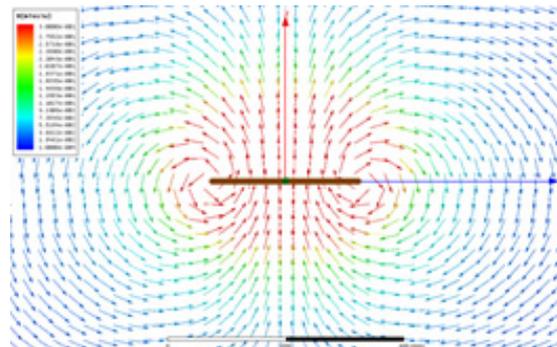


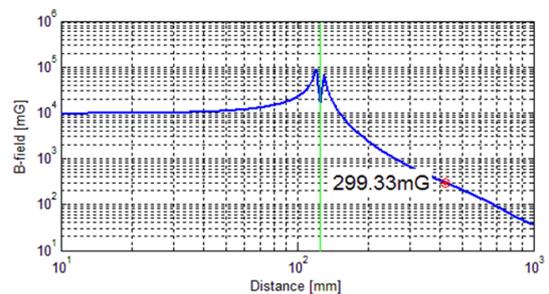
그림 2. 근거리 자기장을 (Near Magnetic Field) 이용한 무선전력전송 시스템의 구성

무선전력전송 시스템은 전자 시스템이며, 전압의 변동 및 전류의 흐름으로 인하여, 원하지 않는 전자파 노이즈가 (Electromagnetic Noise, EMF Noise) 발생하며, 이로 인하여 주위의 다른 전자기기에 오동작을 유발하거나, 주위의 사람에게 유해한 영향을 줄 수 있다. 전자파 노이즈는 전력 송신부 또는 전력 수신부에서도 발생할 수 있으나, 대부분은 코일 시스템에서 가장 심각한 전자파를 유발하므로 본 자료에서는 코일 시스템에서 발생하는 전자파에 관하여 다루려 한다.

그림 3에서 보는 바와 같이 코일에 전류가 흐르면, 코일 주변에는 강한 자기장이 발생하게 된다. 무선으로 전송하고자 하는 전력이 작을 때에는, 일반적으로 전류도 작으므로 발생하는 자기장의 세기도 무시할 정도로 작아질 수도 있겠지만, 전송하고자 하는 전력이 수십W를 초과하게 되면, 자기장의 세기는 무시할 수 없을 정도로 강하게 나타난다. 이러한 자기장 형태의 전자파 노이즈를 EMF Noise라고 부른다.



(a) 자기장의 세기 및 방향



(b) 거리에 따른 자기장의 세기

그림 3. 전류가 흐르는 코일 주위의 자기장의 분포

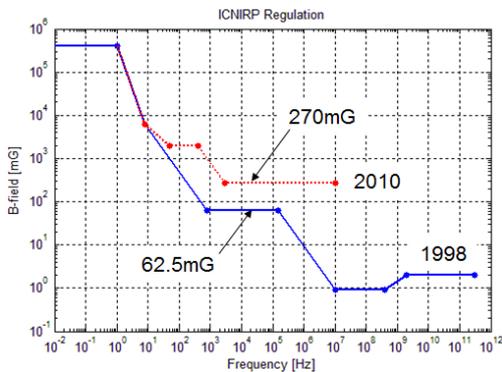
코일 주변에 발생하는 자기장의 세기는 법규에 의하여 허용 한계가 제한되고 있다. ICNIRP는 1998년 시변 자기장의 (Time Varying Magnetic Field) 세기를 그림 4(a)와 같이 제한하고 있다. 800Hz에서 150kHz 까지의 주파수 영역에서 방사되는 자속 밀도 (B-field) 세기를 6.25uT (62.5mG) 이하로 제한하고 있으며, 10MHz에서 400MHz 주파수 영역에서는 0.092uT (0.92mG) 이하의 자속밀도가 방사되어야 한다.

Frequency range	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}	0.0037f ^{1/2}	0.0046f ^{1/2}
2–300 GHz	61	0.16	0.20

(a) ICNIRP Guideline in 1998

Frequency range	E-field strength E (kV m ⁻¹)	Magnetic field strength H (A m ⁻¹)	Magnetic flux density B (T)
1 Hz–8 Hz	5	3.2 × 10 ⁴ /f ²	4 × 10 ⁻² /f ²
8 Hz–25 Hz	5	4 × 10 ³ /f	5 × 10 ⁻³ /f
25 Hz–50 Hz	5	1.6 × 10 ²	2 × 10 ⁻⁴
50 Hz–400 Hz	2.5 × 10 ² /f	1.6 × 10 ²	2 × 10 ⁻⁴
400 Hz–3 kHz	2.5 × 10 ² /f	6.4 × 10 ⁴ /f	8 × 10 ⁻² /f
3 kHz–10 MHz	8.3 × 10 ⁻²	21	2.7 × 10 ⁻⁵

(b) ICNIRP Guideline in 2010



(c) ICNIRP Guideline for B-field

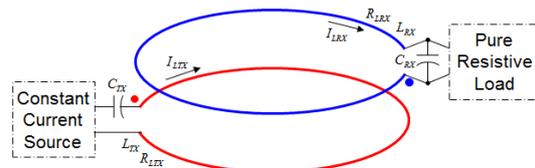
그림 4. ICNIRP Guideline (Limiting exposure to time-varying magnetic field) [7]

그림 4(b)에서 표현되어 있는 바와 같이, 최근 2010

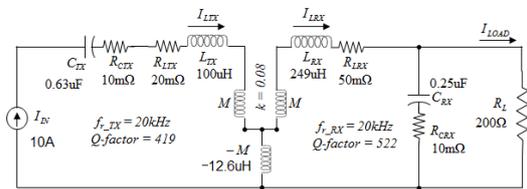
년에 발표된 ICNIRP의 새로운 Guideline을 보면, 3kHz에서 10MHz까지 27uT (270mG) 이하의 시변 자기장의 최고 세기를 허용 한계로 규정하고 있다. 변화된 규정은 그림 4(c)를 통하여 확인 할 수 있듯이, 방사되는 자기장의 허용 한계가 전반적으로 상승하였다. 현재까지의 국내 규정은 1998년에 제정된 Guideline을 적용하고 있으며, 규제의 변경이 매우 조심스럽게 검토되고 있을 것으로 예상된다. 허용 한계의 상향 조정은 자기장을 발생시키는 제품을 개발하고 상용화하고자 하는 입장에서는 유리한 변화이겠지만, 역으로 향후 개발되는 모든 전자제품은, 상향 조정된 자기장 속에서도 정상적으로 동작해야 한다는 것을 의미한다. 즉, 방사 (Emission) 관점에서는 규정이 완화되었지만, 내성 (Immunity, Susceptibility) 관점에서는 규정이 더욱 강화되었음을 의미하기 때문이다.

III. 무선전력전송 시스템 사례 분석

무선전력전송 시스템에서, 코일 시스템 주변의 자기장을 관찰하기 위하여, 우선 코일에 흐르는 전류를 관찰해야 한다. 그림 5는 100V, 50W의 전력을 전송하기 위한 코일 시스템 설계 사례이며, 이 때 발생하는 코일 주변의 자기장의 세기를 관찰하려 한다. [6]



(a) Coil System Structure



(b) Equivalent Electrical Circuit Model

그림 5. 무선전력전송 시스템 설계 사례 (50W)

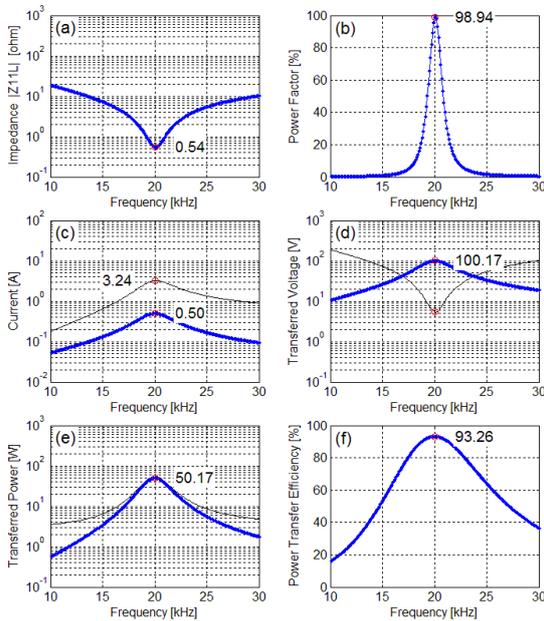
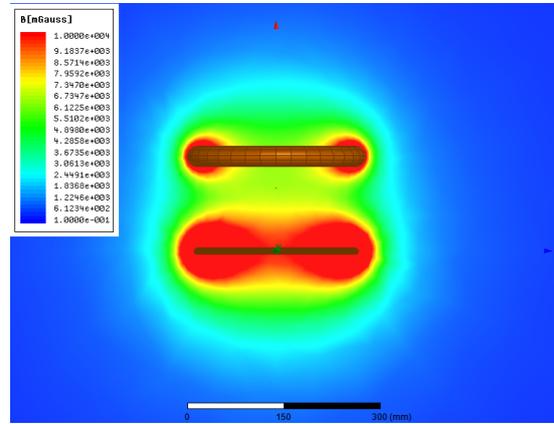


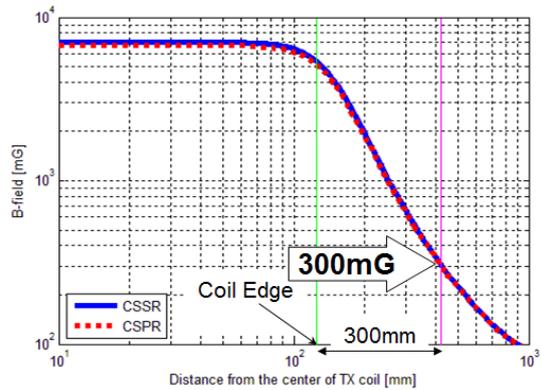
그림 6. 코일 시스템의 동작 특성 분석

그림 5와 같이 설계된 코일 시스템의 주요 변수를 분석하면, 그림 6과 같이 관찰된다. 공진을 위한 코일 시스템의 동작 주파수는 20kHz이며, 해당 공진 주파수에서 입력 임피던스는 그림 6(a)와 같이 0.54Ω으로 관찰되고, 이때 부하에 인가되는 전압은 그림 6(d)와 같이 100.17V이며, 전달되는 전력은 그림 6(e)와 같이 50.17W이다. 코일 시스템의 역률은 98.94%이며, 유효 전력의 전송 효율은 93.26%로 분석 된다. 손실되는 전력은 코일의 유효 기생 저항을 (Effective Parasitic Resistance) 통하여 열손실 되는 것이다.

인덕턴스 100uH의 송신 코일에 항상 일정하게 제어되는 10A의 정전류원이 (Constant Current Source) 인가 될 때, 인덕턴스 249nH의 수신 코일에는 그림 6(c)에서 분석된 바와 같이 3.24A의 전류가 흐르게 된다. 송신 및 수신 코일에 전류가 흐를 때, 코일 시스템 주변에는 그림 7(a)와 같은 자속 밀도의 분포가 형성되며, 코일의 끝에서 300mm 떨어진 지점에서 자속 밀도의 세기는 300mG로 관찰 된다. 이 값은 그림 4의 ICNIRP Guideline에서 표현된 62.5mG 혹은 270mG를 초과하는 값으로, 코일 시스템 주변의 전자파 노이즈를 줄이기 위하여, 추가적으로 설계 조건의 개선이 필요하다.



(a) 코일 시스템 주변의 자속 밀도 (B-field) 분포



(b) Coil에서 300mm 떨어진 지점에서의 B-field

그림 7. 송신 및 수신 코일 주변의 자속밀도의 세기

IV. OLEV 시스템에서의 전자파 현상

무선전력전송 시스템을 구현함에 있어서, 전자파 노이즈의 심각성과 중요성이 부각된 사례는, 온라인 전기자동차 (On-Line Electric Vehicle, OLEV) 시스템에서 찾아볼 수 있다. 온라인 전기자동차는 무선으로 차량에 전력을 전송하는 새로운 개념의 전기자동차이다. 차량이 정차 중일 때는 물론, 주행 중에도 실시간으로 전력을 전송을 할 수 있도록 하여, 전기자동차에 탑재되어 있는 고가의 배터리를 현격하게 줄임으로써, 전기자동차가 가지고 있는 배터리 가격과 무게 문제 및 충전시간에 관한 고질적인 문제를 해결할 수 있다. 온라인 전기자동차는 자기장 발생을 위한 급전선로를 도

로에 설치해야 하는 만큼, 정해진 노선을 따라 운행하는 차량에 적용할 경우 그 효율성이 극대화 된다. 그림 8(a)에서는 버스에 적용된 온라인 전기자동차 사례를 보여주고 있다. 도로의 지표면 아래에 매설된 송신 코일에 흐르는 200A의 전류로부터 자기장이 발생되고, 이 자기장이 버스 바닥면에 부착된 수신코일을 통과하면서 전력을 유도하게 되는 원리를 이용하여, 최대 100kW의 전력을 실시간으로 버스에 전송할 수 있다.

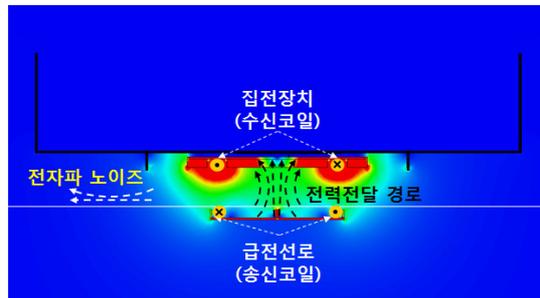
무선전력전송 기술에서 주로 이용하는 자기장의 세기는 전류의 양에 비례하여 증가한다. 따라서 전자파 노이즈 관점에서 볼 때, 수 A 정도의 전류를 사용하는 휴대폰과 같은 소전력 전자기기에 비해, 수십 또는 수백 A를 사용하는 자동차에 적용되는 무선전력전송 시스템에서는 전자파 노이즈 문제가 심각할 수밖에 없다. 그림 8(b)는 온라인 전기자동차의 급전 선로와 집전장치 간 전력전달 경로와 전자파 노이즈 전달 경로를 보여준다. 차량 내부 승객에게 자기장이 전달되지 않도록 차량 하부와 측면에 금속 차폐판이 적용되어 있지만, 차량 하부 측면의 공간을 통해 일부 전자파 노이즈가 전달될 수 있다.

그림 8(c)에서는 이러한 전자파 노이즈 누설을 막기 위해 고안된 능동 차폐장치(Active Shield)의 원리를 보여주고 있다. 전자파 노이즈를 줄이기 위해 의도적으로 추가의 전류발생장치를 차량 주변에 배치하고, 능동 차폐장치에 의해 발생된 자기장과 무선전력전송으로 인해 발생된 자기장이 서로 상쇄가 되도록 전류량과 위치를 제어하여 최종적으로 두 자기장의 벡터 합이 최소가 되도록 한다. 능동 차폐장치는 자기장을 발생시키기 위한 용도로만 설계되므로 그 자체에서 소모되는 에너지는 무시할 수 있을 정도로 매우 적지만 자기장 노이즈 감축에 관점에서는 큰 효과를 볼 수 있다.

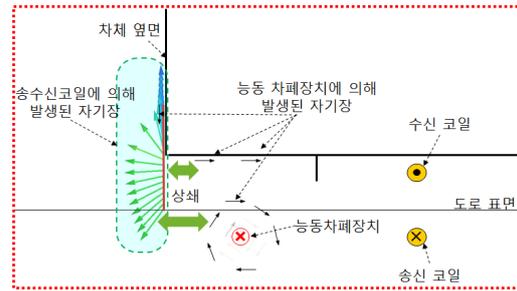
능동차폐 장치는 그림 8(d)와 같이 실제 차량에서 실험적으로 검증되었다. 총 5개의 집전장치가 사용된 온라인 전기버스의 측면 하부 공간에 능동차폐를 적용하여, 능동 차폐장치가 적용되기 전 103mG의 전자파 노이즈를 58mG로 축소시켰고, 국내 전파법이 정하는 62.5mG의 자기장 세기 규제를 만족시켰다.



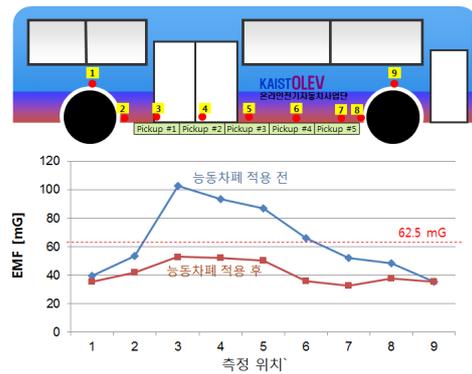
(a) OLEV 기술 개요



(b) OLEV 시스템 주변의 전자파 노이즈 분포



(c) 전자파 노이즈 축소를 위한 능동 차폐장치

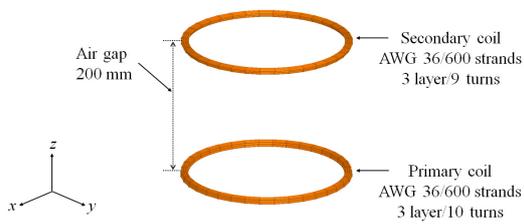


(d) 능동차폐 적용 전/후 OLEV 주변 전자파 노이즈

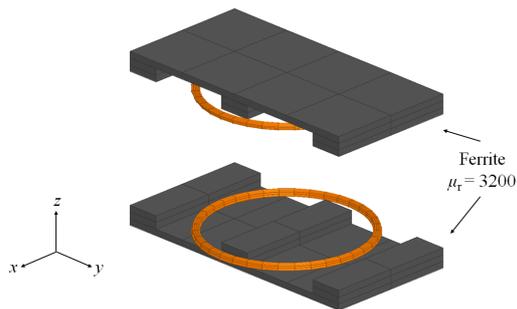
그림 8. OLEV 시스템에서의 전자파 노이즈 현상

V. 전자파 노이즈 축소 기술 사례

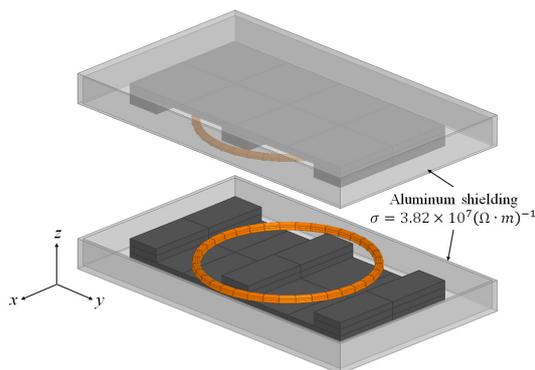
코일 시스템에서 발생하는 전자파 노이즈의 축소를 위한 다양한 기술들이 존재하며, 가장 대표적인 방법은 차폐 기술이다. 그림 9와 그림 10은 100W급 무선전력전송 시스템을 구현함에 있어서, Wire, Ferrite, Metal Shield의 다양한 조합으로 구성된 코일 시스템 및 그 주변의 전자파 노이즈를 표현하고 있다. [9]



(a) Wire로만 구성된 코일 시스템



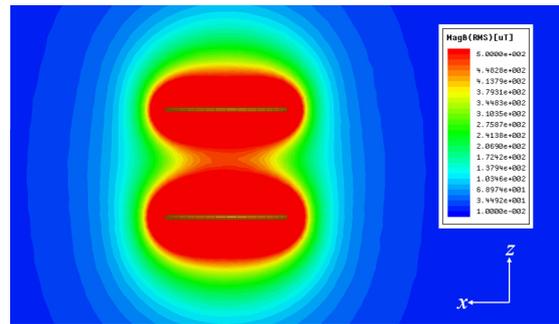
(b) Wire 및 Ferrite로 구성된 코일 시스템



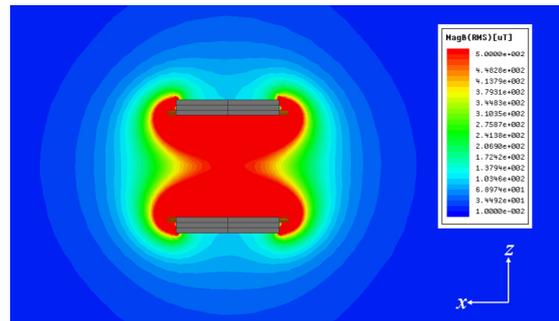
(c) Wire, Ferrite 및 Metal Shield로 구성된 코일 시스템

그림 9. 코일 시스템의 구성 사례

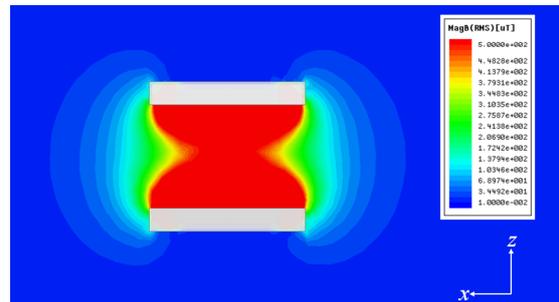
그림 10과 같이, Ferrite 및 Metal Shield를 포함하는 코일 시스템의 경우, Wire로만 구성된 코일 시스템과 비교하여, 코일 시스템 주변에 분포되는 자기장이 매우 감소되었음을 쉽게 확인할 수 있다. 이처럼 Ferrite를 이용하여 Magnetic Flux Path를 확보하고, Metal을 이용하여 차폐한다면 효과적으로 코일 시스템 주변의 전자파 노이즈를 축소시킬 수 있다. [9]



(a) Wire로만 구성된 코일 시스템



(b) Wire 및 Ferrite로 구성된 코일 시스템



(c) Wire, Ferrite 및 Metal Shield로 구성된 코일 시스템

그림 10. 코일 시스템의 구성에 따른 코일 시스템 주변의 전자파 노이즈 분포

VI. 결론

모바일 기술의 급격한 발전과 더불어, 무선전력전송 까지 가능한 전자기기에 관한 소비자의 요구가 증가하고 있다. 자기장을 (Magnetic Field) 이용하여 대전력을 무선으로 전송하기 위해서는 대전류가 요구되며, 코일 시스템에서 발생하는 전자파 노이즈 발생 가능성은 점점 증가하고 있다.

무선전력전송 시스템에서 발생하는 전자파 노이즈의 허용 한계를 제안하고 있는 ICNIRP의 Guideline 및 국내 법규를 만족하면서, 고효율 대전력의 원거리 무선전력전송 시스템을 구현하기 위해서는, 전자파 노이즈를 (EMF Noise) 고려하여 WPT 시스템이 설계되어야 한다.

참고문헌

[1] Tesla's Tower by Nikola Tesla, New York American, May 22, 1904.
http://www.teslasociety.com/tesla_tower.htm

[2] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, Marin Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science, Vol. 317. no. 5834, pp. 83-86, July 6, 2006.
<http://www.witricity.com/pages/papers.html>

[3] 2012년도 특별보고서, 전기자동차 비접촉 충전의 동향과 전망 - 무선충전 (Wireless Charging)의 동향, 2012

[4] Jonghoon Kim, Hongseok Kim, In-Myoung Kim, Young-Il Kim, Seungyoung Ahn, Jiseong Kim, and Joungho 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), Vol. 11, No. 3, pp. 166-173, Sep. 2011.

[5] Jonghoon Kim, Hongseok Kim, Seungyoung Ahn, Jiseong Kim, In-Myoung Kim, Young-il Kim, and Joungho 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),

pp. WeB2-2 SE02_1002, Oct. 2011.

[6] Jonghoon Kim, Hongseok Kim, Mijoo Kim, Seungyoung Ahn, Jiseong Kim, and Joungho Kim, "Analysis of EMF Noise from the Receiving Coil Topologies for Wireless Power Transfer," Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), pp. TH-AM-PE2-2, May 2012.

[7] ICNIRP Guidelines, "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.

[8] Seungyoung Ahn, Junso Pak, Taigon Song, Heejae Lee, Junggun Byun, Deogsoo Kang, Cheol-Seung Choi, Yangbae Chun, Chun taek Rim, Jae-Ha Yim, Dong-Ho Cho, and Joungho Kim, "Low frequency electromagnetic field reduction techniques for the on-line electric vehicle (OLEV)," IEEE Electromagnetic Compatibility Symposium, pp. 625-630, Jul. 2010.

[9] Hongseok Kim, Jonghyun Cho, Seungyoung Ahn, Jonghoon Kim, Joungho Kim, "Suppression of Leakage Magnetic Field from a Wireless Power Transfer System using Ferrimagnetic Material and Metallic Shielding," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Accepted, Aug. 2012

저자소개

김종훈 (Jonghoon Kim)



1995년 영남대학교 전자공학과 (학사)
1998년 한국과학기술원 전기및전자공학과 (석사)

2003년 한국과학기술원 전기및전자공학과 (박사)
2003년-2010년 삼성전자 메모리사업부 책임연구원
2010년-현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 연구교수
2010년-현재 한국과학기술원 미래자동차학제전공 겸임교수

※관심분야: Wireless Power Transfer (WPT), EMI/EMC, Signal Integrity (SI), Power Integrity (PI), Jitter Analysis



김지성 (Jiseong Kim)

1994년 홍익대학교 전기제어공학과 (학사)
1997년 Electrical and Computer Engineering, Univ. of Texas at Austin (석사)

2000년 Electrical and Computer Engineering, Univ. of Texas at Austin (박사)
2000년-2006년 삼성전자 수석연구원
2007년-현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 연구교수
※관심분야 : High-speed interconnection, 3D package, High-speed serial interfaces, Wireless Power Transfer



김홍석 (Hongseok Kim)

2011년 성균관대학교 전기전자공학과 (학사)
2011년-현재 한국과학기술원 미래자동차학제전공 (석사과정)

※관심분야 : 전기 자동차, 무선 충전 기술, 무선 전력 전송



송치익 (Chiuk Song)

2012년 충남대학교 전파공학과 (학사)
2012년-현재 한국과학기술원 미래자동차학제전공 (석사과정)

※관심분야 : 무선 전력 전송, 전자파 차폐



안승영 (Seungyoung Ahn)

1998년 한국과학기술원 전기및전자공학과 (학사)
2000년 한국과학기술원 전기및전자공학과 (석사)

2005년 한국과학기술원 전기및전자공학과 (박사)
2005년-2009년 삼성전자 DM사업부 책임연구원
2009년-2011년 한국과학기술원 전기및전자공학과 연구교수
2011년-현재 한국과학기술원 조천식 녹색교통대학원 조교수

※관심분야: Wireless Power Transfer System Design, Electromagnetic Compatibility (EMC) Design for Digital Systems Applications



김정호 (Jounggho Kim)

1984년 서울대학교 전기공학과 (학사)
1986년 서울대학교 전기공학과 (석사)

1993년 Electrical Engineering, Univ. of Michigan (박사)
1993년-1994년 Picometrix Inc.
1994년-1996년 삼성전자 메모리사업부 수석연구원
1996년-현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 교수
2011년-현재 전기및전자공학과 학과장
※관심분야 : TSV, WPT, EMC modeling, design, measurement methodologies of 3D IC, SIP, multi-layer PCB, EMI and EMF reduction design.