

자기공명기반의 모바일 단말기용 무선전력전송 기술 구현

임용석, 양우진, 임승욱
전자부품연구원

요약

본고에서는 송신단과 수신단 사이에 접점 없이 높은 효율을 유지하면서 기존의 방식(전자기파방식, 전자기파방식) 보다 실용적인 거리의 무선전력전송이 가능한 자기공명방식 무선전력전송 기술을 소개하고 이를 모바일 단말기용에 적용하기 위하여 고효율 송/수신단 회로 설계, 자기공명안테나 설계, 실시간 임피던스 매칭 기술, 실시간 전력제어 기술 등등의 구현을 위한 요소기술에 대하여 소개함으로써 자기공명방식이 가지고 있는 특성을 구체적으로 알아본다.

I. 서론

최근 IT기술, 특히 4세대 mobile communication technology device의 급속한 발전과 더불어 2000년대 디지털혁명에 이어 스마트혁명이 새로운 패러다임으로 변화하고 있다. 사용자는 모바일 환경에서 더 많은 편리한 서비스를 요구하고 있으며, 서비스 공급자는 더 많은 기능을 제공하고 있다. 이로 인하여 모바일 핸드폰이나 모바일 단말기는 더 많은 에너지를 소모하게 되었다. 전력의 공급을 위해서 잦은 배터리 교체나 충전은 단말기 사용자의 편의성을 떨어뜨리는 주된 요인이 되고 있다. 그러나 스마트하게 변화되고 있는 패러다임의 변화 속에 유일하게 발전이 지체되고 있는 분야가 바로 전원공급 관련 분야이며 유선의 traditional battery 공급방식으로는 디바이스에 충분히 편리한 방식으로 전력 공급을 할 수 없다. 이러한 제약을 극복하기 위하여 최근 무선으로 에너지를 전달 하고자 하는 시도들이 연구되고 있으며 관련제품들도 나오고 있는 상황이다.

무선전력 전송기술에는 전자기파방식(RF based), 전자기유도(Inductive coupling) 방식, 자기공명(Resonant magnetic coupling)방식 등으로 구분할 수 있다.

전자기파방식(RF based)은 전파되는 전자기파의(propagating electromagnetic waves)의 원역장(far-field)

을 이용하여 에너지를 전송하며 900MHz UHF RFID등에 적용하여 응용되고 있다. 수십미터 이상의 원거리에 에너지 전송이 가능하나 방향성(directionality) 제약과 효율(transmission efficiency)이 낮은 단점이 있다 [1][2].

전자기유도방식(Inductive coupling)은 코일간의 유도현상을 이용한 방식으로 근접거리(수cm)에서 효율이 95%이상 얻을 수 있으며[3][4], Wireless Power Consortium(WPC)에서 이미 Qi 1.0 국제표준을 2010년에 내놓은 바가 있다 [3].

자기공명방식(Resonant magnetic coupling)은 2007년 MIT 연구팀에서 두 코일간의 strongly coupling에 의한 무선전력 전송에 대한 연구를 발표[6]하였으며 약 10MHz의 공진주파수를 이용하여 거리 2m에서 60W의 에너지를 40~50% 효율로 전송한 바가 있다.

송수신 코일간 자기장 공명 현상을 이용하는 자기공명방식은 전자기유도방식 보다 수 m 수준의 실용적인 거리 내에서 효율적인 에너지 전송 가능하다는 장점이 있다 [4]. 이러한 이유로 상용화 및 제품화를 위하여 많은 연구와 투자가 이루어지고 있는 분야이다. 그러나 반면에 공명체 설계가 어려우며 높은 에너지밀도를 유지하기 위한 적응형 임피던스매칭(Adaptive Impedance Matching)제어가 반드시 필요하다. MIT에서 제안한 방식은 2개의 송수신 안테나(Source Loop(A), Load Loop(B)) 외에 추가 2개의 loop coil(S,D)을 이용하여 matching제어를 하고 있으며[5] 이러한 구조는 안테나 구조적 사이즈 문제로 소형 디바이스에는 적합하지 않다.

본고에서는 자기공명방식에 기반을 둔 모바일 단말형에 적합한 구조의 무선전력전송 송수신단 구조설계 및 설계 시 고려되어야 할 핵심요소 사항에 대하여 알아본다.

II. 본론

본고에서는 이동형의 소형 디바이스에 적합한 구조로서 송신 코일과 수신코일간의 공진주파수를 일치시켜 근거리 상에서 전

력전송 효율을 높이는 자기공명을 이용한 무선전력전송 방식에 기반을 두고 있으며 특히 이를 상용화에 가깝게 구현하기 위해서는 다음과 같은 기술적 난이도가 있는 사항에 대하여 고려가 이루어져야 한다.

- 고효율 송수신단 회로 설계 기술
- 자기공명안테나 설계기술
- 실시간 임피던스 매칭 기술
- 실시간 전력제어 기술

다음에는 이러한 요소기술에 대하여 하나씩 알아본다.

1. 고효율 송/수신단 회로 설계 기술

무선전력전송은 <그림 1>과 같이 송신전력을 생성하는 AMP 및 송신안테나, 안테나 매칭부 등으로 구성된 송신단과 수신단 안테나, 수신전력을 DC를 변환하는 정류기 및 DC-DC 컨버터로 구성되어 있다.

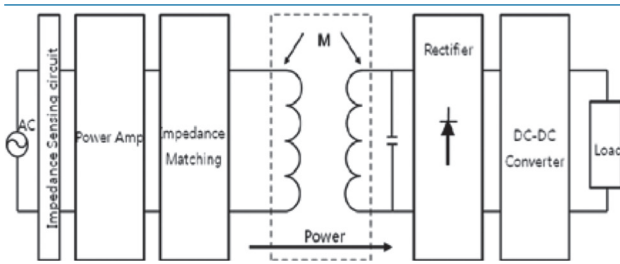


그림 1. 무선전력전송 송수신단 블럭도

송신단의 핵심이 되는 파워AMP는 <그림 2>와 같이 간단히 설명될 수 있다. P1과 N2, P2와 N1이 동시에 ON이 되며 P1, P2신호는 각각 N2, N1신호의 반전(Inverting)된 신호로써 송신주파수에 따라 결정된다.

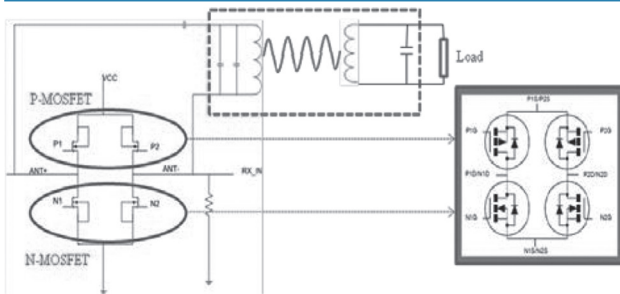


그림 2. 송신단 파워AMP 구조

수신단 구조는 <그림 3>과 같이 송신단에 비하여 간단하게 구현할 수 있다. 그러나 정류기나 DC-DC컨버터를 얼마나 효율적으로 구현하는 것이 관건이다.

모바일 단말기용 고효율 송수신단과 수신단을 개발하기 위해서는 이외에도 중요한 기술적인 요소가 필요하다. 실제 단말기

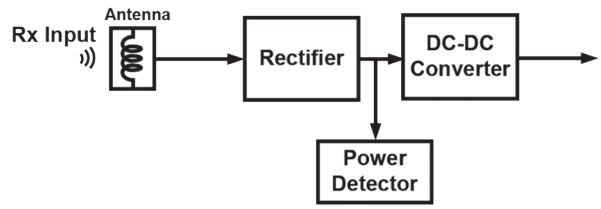


그림 3. 무선전력전송 수신단 블럭도

에서의 송수신단간의 에너지 전송은 매우 낮은 투자율을 갖는 PCB, Component등의 금속성분에 매우 큰 영향을 받는다. 즉 이러한 물질로 구성된 디바이스에 공진안테나를 부착하였을 시 자기력을 상쇄시켜서 안테나의 인덕턴스, Quality Factor 값이 급격하게 감소한다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 디바이스와 공진안테나 사이에 <그림 4>와 같이 Magnetic Sheet와 Shield를 삽입하여 자기 공진 안테나를 설계한다. Magnetic Sheet의 경우 투자율이 높은 Ferrite Ceramics 성분으로 구성되었기 때문에 Sheet 내부로 자기력선이 집중 되어 자기력의 손실을 방지할 수 있다. Shield의 경우는 충전 Device와 공진안테나를 격리시켜서 디바이스 상의 PCB, Component가 구동되는 동안 발생되어지는 전자기장으로부터 자기 공진 안테나에서 생성된 자기장 손실을 방지한다.

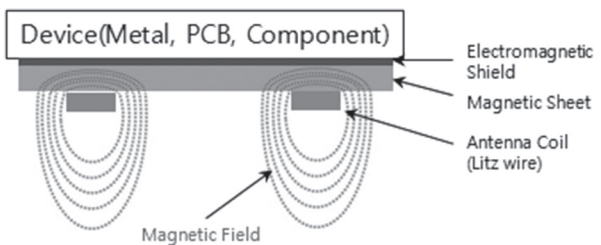


그림 4. Magnetic Sheet와 Shield적용

측정에 따르면 자기공진안테나를 자유공간상태(AIR), 충전 디바이스에 부착한 상태에서 Magnetic Sheet를 삽입하여 성능을 비교 분석하면 Quality Factor값이 Magnetic Sheet의 성능(두께)에 따라 상승함을 볼 수 있다. <표 1>에서 확인할 수 있듯이 자유 공간상에서 측정된 안테나의 Quality Factor는 주파수에 따라 각각 260(370 kHz), 143(128 kHz)로 높은 값을 얻을 수 있지만, 충전 Device와 직접 부착하면 각각 18.94(370 kHz), 14.34(128 kHz)로 급격하게 감소하여 무선전력전송용 공진 안테나로 사용할 수 없다. 그러나 Magnetic Sheet와 Shield를 1매 삽입할 경우 손실 저항은 각각 47.3%(370 kHz), 46.4%(128 kHz) 감소, 인덕턴스는 각각 143%(370 kHz), 135%(128 kHz) 증가, Quality Factor가 각각 349%(370 kHz), 339%(128 kHz) 증가한다.

표 1. Magnetic Sheet에 따른 자기공진안테나 특성(MURAWA사의 FSF501)

SHEET / SHIELD	Freq. (kHz)	L(μH)	Q	R(mΩ)
AIR	370	35.1	260	313
	128	34.91	143	196
NO	370	18.05	18.94	2276
	128	18.53	14.34	1040
1매 (0.35 mm)	370	43.82	85	1198
	128	43.72	62.98	558
2매 (0.6 mm)	370	46.02	104.84	1020
	128	45.87	75.4	489
3매 (0.85 mm)	370	47.03	111.06	984
	128	46.82	81.82	460
4매 (1.1 mm)	370	46.98	113.5	962
	128	46.8	82.68	455

따라서 고효율 송/수신단 설계를 위해서는 회로적인 측면 뿐 아니라 디바이스에 적용하는 Material에 대한 고려도 반드시 필요하다.

2. 자기공명 안테나 설계 기술

자기공명 안테나 제작 시에 가장 중요하게 고려하여 할 사항이 안테나 자체가 가지고 있는 내부 저항 및 방사 저항으로 저항 성분이 작으면 작을수록 Quality Factor가 높아지고 효율도 최대가 된다. 그러므로 안테나를 제작하는 Wire에 선택은 효율을 향상시키기 위해서 중요한 고려사항이 된다. 안테나 제작 시 이용한 Litz Wire는 지름 0.1mm 정도의 가는 에나멜선 또는 폴리우레탄선 등을 10가닥 내지 수십 가닥을 각각 1가닥씩 특수한 절연체로 도포하거나 견사로 감은 전선으로 표면을 물리적으로 크게 하기 위한 것이며, 통 구리 Wire에 비해서 전기적으로는 표피 효과를 작게 하여 주파수 특성이 좋고 제작도 쉽다.

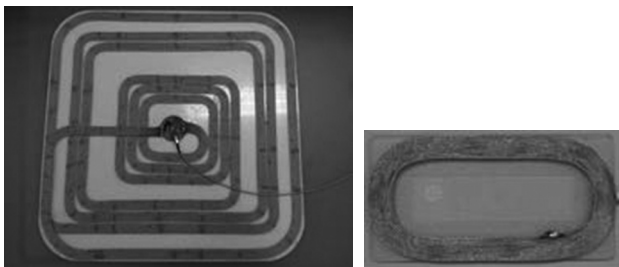


그림 5. 자기공명 송신부(좌)/수신단(우) 안테나

	L	R	Q
송신부	12.27μH	38mΩ	750
수신부	17.865μH	242mΩ	171

자기공진 안테나의 전송 효율을 향상을 위해 특성이 좋은 Capacitor를 사용하여야 하는데 Capacitor가 가지고 있는 ESR(Equivalent Series Resistance)이 작고 온도 변화에 따른 특성 변화도 작은 Capacitor를 적용하여야 한다. 높은 Capacitor ESR은 자기공진 안테나의 내부 저항을 높여서 안테나 자체의 Quality Factor를 떨어뜨린다. <그림 6-7>은 Capacitor의 ESR이 0Ω일 때와 10mΩ일 때 같은 거리의 자기공진 안테나를 Agilent사의 ADS로 시뮬레이션 한 것으로 Capacitor ESR 0Ω일 때 전송 효율이 -2.107dB(61.6%)이지만 10mΩ일 때는 -8.678dB(13.6%)로 효율이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.

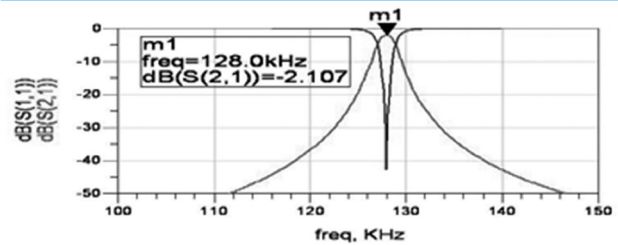


그림 6. ESR 0Ω일 때의 시뮬레이션

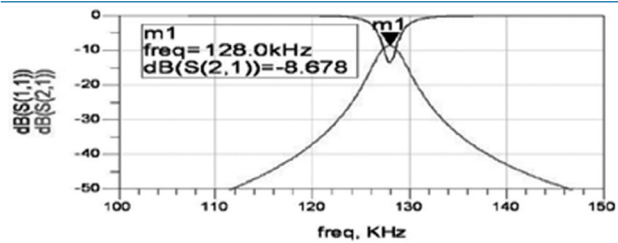


그림 7. ESR 100Ω일 때의 시뮬레이션

3. 실시간 임피던스 매칭 기술

일반적으로 자기공진방식은 공진 및 임피던스 매칭을 하는 방식에 따라 공진커플러와 루프를 이용하는 MIT에서 구현하였던 방식과 커플러에 직접 Capacitor를 Tuning 하는 방식으로 구분될 수 있다. 본고에서는 커플러(Coupler)에 Capacitor를 이용한 방식을 사용하여 구현하고자 한다. 자기공진방식의 특성상 송수신단의 이격 거리가 변화되거나 금속성 이물질, 다수의 디바이스에 의한 상호 영향 등에 따라 에너지 전송 선로상의 매칭 임피던스가 변화되어 전력전송효율이 급격히 떨어진다. <그림 8>은 거리 1m에서 특성 임피던스가 50ohm인경우의 Agilent사의 ADS를 이용한 시뮬레이션을 보여준다. 임피던스는 약 53.4 ohm으로 특성 임피던스 50옴에 근접함을 알 수 있다. 반면 <그림 9>는 0.5m로 송수신 이격 거리가 변화 되었을

시 임피던스는 약 785.1옴으로 증가되면서 공진주파수가 분리되어 우모드(even mode) 와 기모드(odd mode) 주파수가 발생함을 알 수 있다.

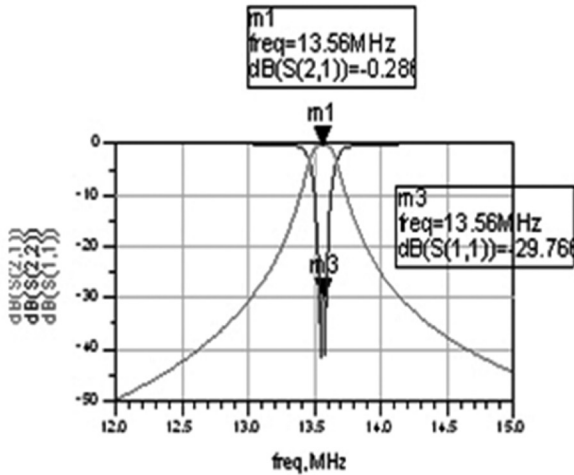


그림 8. 거리 1m에서 매칭 시 시뮬레이션

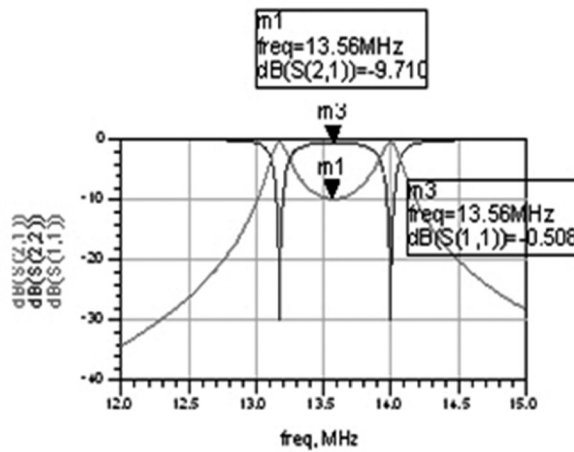


그림 9. 거리 0.5m로 이동 시 시뮬레이션

이러한 자기공진방식의 특성으로 인하여 송수신간의 이격 거리에 대한 자유도를 허용하는 응용에 대해서는 송수신단간의 거리의 변화에 대하여 즉각 반응하여 임피던스 매칭을 실시간으로 수행해야 하는 기능이 필수적으로 요구된다.

본고에서는 <그림 10>과 같은 방법으로 capacitor를 이용하여 임피던스를 실시간 매칭하고 있으며 공진주파수를 유지하면서 임피던스를 가변할 수 있는 Cserial과 Cparallel의 조합을 찾을 수 있다. 이때 중요한 요소는 임피던스가 가변적으로 변화하면서 발생할 수 있는 의도하지 않은 전류에 의한 에너지 손실을 최소화 하도록 해야 한다.

<그림 10>의 구조에 의해 실시간의 임피던스를 추적할 수 있는 알고리즘을 제안할 수 있다. 또한 최단 시간에 최적의 매칭 포인트를 찾아가는 알고리즘을 제안할 수 있다.

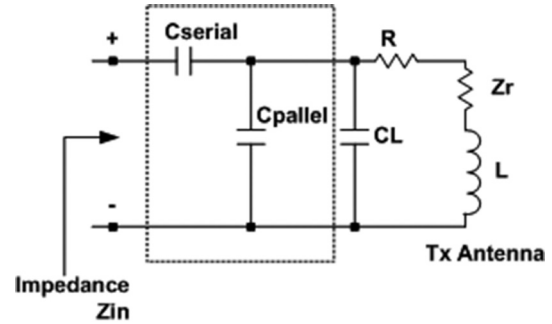


그림 10. 실시간 임피던스 매칭 등가회로

4. 실시간 전력제어 기술

마지막으로 본 장에서는 실시간 전력제어를 위한 기술에 대해 논하고자 한다. 실시간으로 전력을 제어하는 이유는 명확하다. 임피던스가 가변되면 이에 따라 송수신단에 유도되는 전류도 가변이 된다. Load에서 갑작스런 전류를 끌어당기면 송신단에 급격한 전류의 흐름이 발생하고 송신단 회로에 강한 충격을 준다. 따라서 수신단에서 처리할 수 있는 전력을 송신단에서 공급할 수 있도록 해야 한다.

이를 위해서는 송신단과 수신단 사이에 통신기능이 요구된다. 통신방식에 대해서는 여러 가지 방식이 있겠지만 본고에서는 송신전력과 같은 채널을 사용하는 in-band 통신에 대해 설명하고자 한다. 자기장 통신(magnetic induction communication)을 이용한 통신은 근거리장(Near-Field) 내에서 생성되는 자기장의 특성을 이용하여 통신을 하는 것을 말한다.

자기장 통신은 근거리장 (Near field)내에서 생성되는 자기장의 현상을 이용한다. 근거리장은 안테나에서의 전류변화에 따라 강한 자기 유도가 발생하는 구간이며 전기장 및 자기장이 안테나로부터 분리되어 전자파 형태로 전파를 시작하는 거리까지의 영역을 말하며 수식은 다음과 같다.

$$d = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (d: \text{근거리장}, \lambda: \text{신호파장})$$

<그림 11>과 같이 Small Loop에서 형성되는 전자기장 (electromagnetic field)을 살펴보면 근역장(Near field)에서

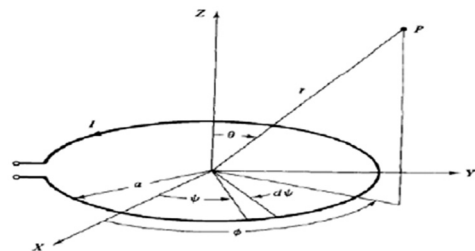


그림 11. Small Loop 안테나 모델링

는, 즉, 이 성립되는 구간에서는 H-filed가 이 성분에 의해 dominant 하게 된다 [6][7].

$$E_{\phi} = \eta \frac{k^2 m}{4\pi} \left[\frac{1}{kr} - \frac{j}{(kr)^2} \right] \sin \theta e^{-jkr}$$

$$H_r = j \frac{2k^3 m}{4\pi} \left[\frac{1}{(kr)^2} - \frac{j}{(kr)^3} \right] \cos \theta e^{-jkr}$$

$$H_{\theta} = -\frac{k^3 m}{4\pi} \left[\frac{1}{kr} - \frac{j}{(kr)^2} - \frac{1}{(kr)^3} \right] \sin \theta e^{-jkr}$$

$$m = (\pi a^2)I \quad \text{Magnetic dipole moment}$$

자기장의 특성은 매질에 따라 신호 감쇄율 변화가 거의 없으며 매질 변화에 의한 multi-path-fading이 거의 없는 장점이 있다. 또한 수백 kHz의 저주파 대역을 사용함으로써 상대적으로 높은 skin-depth를 갖는다. 반면에 자기장의 세기는 $1/r^3$ 의 비율로 거리에 따라 감소하는 특징이 있다. 그러나 통신거리는 전력전송거리에 비하여 상대적으로 많기 때문에 구현 시 제약이 되지 않는다.

〈그림 12〉는 본고에서 구현한 자기장통신을 이용한 In-Band 통신의 송신단 블록도를 나타낸다. 본고 적용한 통신 블록은 송신시 BPSK 모듈레이션(modulation), 수신시 ASK를 사용하는 구조로 설계되어 있다. In-Band통신과 충전을 위한 Quality Factor에는 상호 반대되는 개념이 존재한다. 통신속도를 확보하기 위해서는 넓은 3dB Bandwidth를 확보해야 하나 충전의 효율을 위해서는 반대로 Bandwidth를 좁혀서 Quality Factor를 확보해야 한다. 따라서 본고에서 구현하는 In-Band통신은 적응적으로 대응하도록 설계하였다.

$$Q = \frac{\text{Center_Frequency}}{3dB_Band}$$

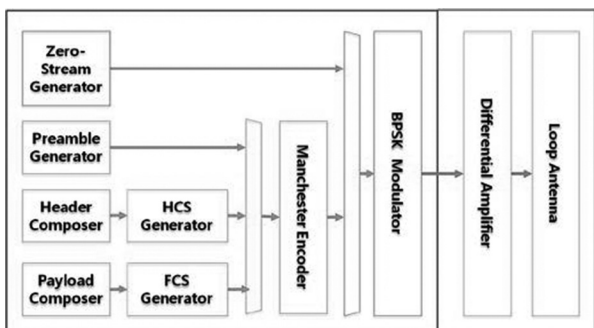


그림 12. 전력제어를 위한 통신 송신단 블록도

〈그림 13〉은 전력을 송신하지 않은 상태에서 단순히 BPSK 변조를 이용한 측정 waveform을 보여준다. 〈그림 14〉는 충전시 위상변화 없이 CW가 전달되는 상태이며 〈그림 15〉의 경우는 충전을 위한 CW가 전달되면서 통신신호를 인가하여 위상이 변화되는 측정을 보여 준다.

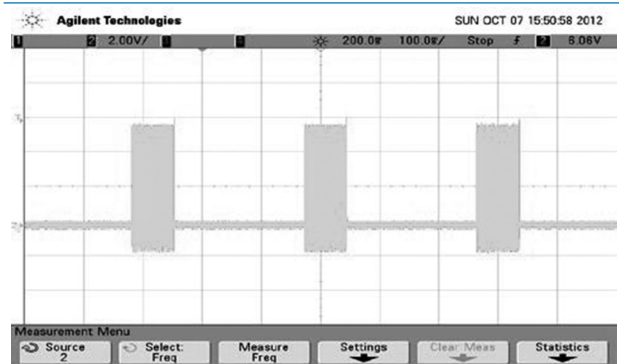


그림 13. In-Band 통신 Waveform

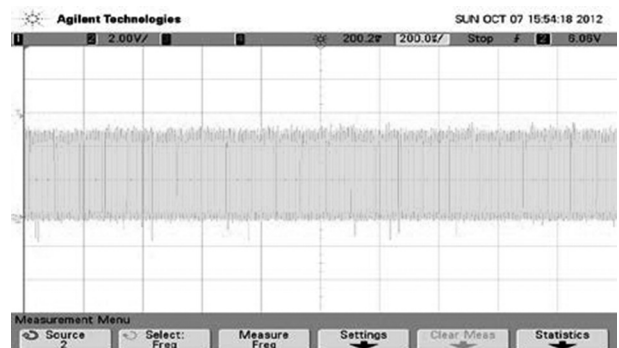


그림 14. 충전 시 Waveform

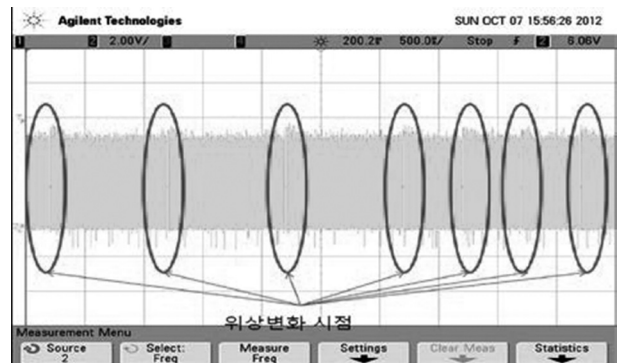


그림 15. 충전+ 통신시 Waveform

III. 결론

본 기술을 적용하여 〈그림 16〉에서와 같이 모바일 단말기에서 모바일 단말기 간의 무선전력전송, 노트북에서 모바일 단말

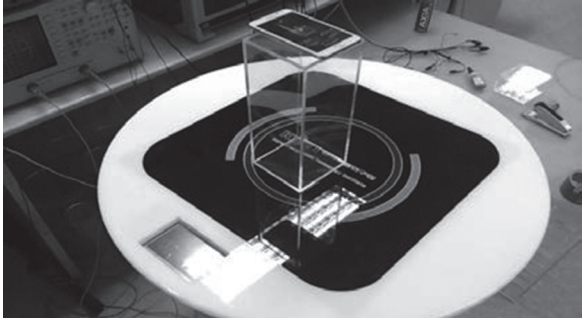


그림 16. 자기공명방식의 무선전력전송 구현

기간의 무선전력전송 및 테이블형 베이스스테이션에서 최대3대의 모바일 단말기에 동시에 무선으로 에너지를 공급하는 기능의 플랫폼을 구현할 수 있다.

본고에서는 자기공명방식의 모바일 단말용 무선전력전송을 구현하기 위하여 요구되는 4가지의 요소 기술에 대한 내용에 대하여 알아보았다. 최근 많은 주목을 받고 있는 자기공명방식의 무선전력전송을 이용한 제품의 상용화를 위해서는 전송 효율에 크게 영향을 주는 고효율 회로설계부터 효율적 실시간 제어, 소형화 하면서 품질 계수는 향상할 수 있는 자기 공진 안테나 설계 방법과 품질계수를 높이기 위하여 두께는 얇아지면서 높은 투자율을 갖는 재료에 관한 지속적인 연구 개발이 필요하며 이외에도 인체의 유해성에 대한 연구도 함께 이루어져야 할 것으로 보인다.

Acknowledgement

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행한 연구로부터 도출된 것이다.[과제번호: 10035255, 휴대단말용 Dual Band 멀티모드 인터랙티브 무선충전 융합기술 기술개발]

참고 문헌

[1] S. Ahson and M. Ilyas, RFID Handbook: Applications, Technology, Security, and Privacy. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008

[2] M. Zargham and P. Glenn Gulak, "Maximum achievable efficiency in near-field coupled power transfer systems," IEEE Trans. Biomedical circuit and systems, vol. 6, no. 3, Jun 2012

[3] Wireless Power Consortium, <http://www.wirelesspowersonsortium.com/>

[4] A. Kurs, A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M.

Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", Science, pp. 83-86, Jul. 2007

[5] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficiency wireless non-radiative mid-range energy transfer" Annals of Physic, vol.323, pp.34-48, January 2008.

[6] Schantz, H.G. "A near field propagation law & a novel fundamental limit to antenna gain versus size," Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE, vol. 3A, pp. 237-240

[7] Said M.Mikki, Yahia M. M. Antar, "Near-filed analysis of electromagnetic interactions in antenna array through equivalent dipole models," IEEE Trans. Antenna Propagat., vol. 60, pp.1381-1389, Mar. 2012

약 력



임 용 석

2001년 고려대학교 전기전자전파공학사
 2003년 고려대학교 전자공학석사
 2011년~현재 고려대학교 전기전자전파공 박사과정
 2007년~현재 전자부품연구원 무선플랫폼센터 선임연구원
 관심분야: 무선전력전송, 자기장 통신, 통신 SoC 설계, Embedded System 설계



양 우 진

2005년 국립군산대학교 정보통신전파공학사
 2007년 국립군산대학교 정보통신전파공학석사
 2007년~2008년 GSI 통신연구소 연구원
 2010년~현재 전자부품연구원 무선플랫폼센터 연구원
 관심분야: 무선전력전송, 자기장 통신, 안테나, RF 시스템



임 승 옥

1997년 건국대학교 전자공학 학사
 1999년 건국대학교 전자공학 석사
 2005년 건국대학교 전자정보통신공학 박사
 2001년~현재 전자부품연구원 무선플랫폼센터 센터장
 관심분야: 무선전력전송, 자기장 통신, 국제표준화