

휴대단말기 무선전력 전송모듈용 전자기파 차폐소재

배석* · 최돈철 · 현순영 · 이상원

LG이노텍 부품소재연구소 응용소재랩 기능소재팀, 경기 안산시 상록구 사3동 1271번지, 426-791

(2013년 3월 19일 받음, 2013년 4월 8일 최종수정본 받음, 2013년 4월 9일 게재확정)

자기유도형 기반의 무선전력 전송 기술을 이용한 무선충전 기능이 최근 스마트폰 등에 채용되어 주요한 소비자 편의기능으로 자리잡고 있다. 무선전력전송 모듈은 무선전력 전송효율을 개선하고 휴대폰 주요 회로부에 대한 전자기장 간섭을 억제하기 위하여 전자기장 차폐 소재의 사용이 필수적이다. 본 논문에서는 무선전력 전송모듈용 전자기장 차폐 소재의 역할과 기술에 대해 소개하였다. 이와 함께 향후 확산될 중급 전력(mid-power)과 대전력(high-power)영역의 무선전력 전송 응용분야에서 대응 가능한 차폐 소재의 개발 방향을 정리하였다.

주제어 : 무선전력 전송, 무선충전, 전자기파 차폐

I. 서 론

무선전력 전송분야는 교류전력 상용화 기술을 확립한 N. Tesla 의해 1890년대 초 그 가능성이 입증되었고 특히 등록되어[1] 최근까지 수동형 RF-ID(Radio frequency identification) 분야, 자기유도형 가열 등 극히 일부 분야에만 제한적으로 이용되어 왔다. 그 주요한 이유는 전력전송효율이 매우 낮고 또한 인체에 대한 유해성 논란으로 상용화가 어려웠기 때문이다. 그러나 스위칭 소자, 안테나 및 자성소재 등 관련 기술의 발전에 힘입어 기존의 문제들에 대한 해결이 가능해지면서 최근 들어 그 응용 제품들이 앞다투어 개발되고 있다.

배터리를 내장한 휴대형 전자기기에 적용되고 있는 무선전력 전송기술(WPC; wireless power charger)는 전력공급원과 전력수신부 사이에 전자기 유도 현상 혹은 자기 공명 커플링 현상을 이용한다. 추후 더 많은 휴대용 전자기기에 무선충전 기능을 사용할 수 있게 될 것이며, 좀 더 큰 전력을 필요로 하는 태블릿 PC, 노트북 PC, 가전기기 그리고 전기자동차와 전기버스, 심지어 모노레일과 기차에서 까지도 그 응용이 검토되고 있다[2]. 이와 같이 무선전력 전송기술을 적용한 제품에 대한 편의성에 대해서는 모든 사람들이 직관적으로 인지하고 있고, 따라서 상용화 검토와 개발이 진행되고 있다. 하지만 다음의 두 가지 근원적 질문에 대하여 개발자와 사용자 모두들 궁금해 하고 있으며, 그에 대한 해답을 찾았을 때 해당 분야의 제품이 상용화 수준에 이르렀다고 볼 수 있을 것이다. 첫째는 ‘에너지 전송효율은 기존의 유선 방

식과 비교하여 대등한 정도인가?’이다. 무선방식의 전력전송은 공기 및 기타 비전도성 매질을 통하여 전자기장 에너지를 전달하는 것이므로 전송거리에 따른 감쇠가 매우 크다. 전기 에너지를 전자기에너지로 변환하여 전송하고, 이를 수신하여 다시 전기에너지로 변환하는 과정에서 발생하는 에너지 손실 및 누설 등을 고려할 때, 무선방식의 전력전송은 유선방식보다 에너지 전송 효율이 낮아지게 된다. 전송효율을 유선방식에 근접한 수준까지 올리기 전에는 차량 등과 같이 대전력(high-power)이 필요한 분야에 사용은 어렵지만, 휴대폰과 같이 5 W 수준의 저전력(low-power)을 사용하는 기기에는 에너지효율이 다소 낮더라도 소비자가 불편을 느끼지 못하는 단시간에 충전이 이뤄지므로 적용이 가능하다는 의미이다.

두번째는 ‘인체에 안전한가?’이다. 전자기장 에너지는 공간으로 방사되는 특성을 가지므로 전력에너지 송신단과 수신단 사이의 거리가 멀어지면 그 공간으로 전자기장 에너지의 누설 현상이 발생하게 된다. 그 결과, 에너지 전송 효율이 저하되고 동시에 근처에 위치한 사람에게 전자기장이 노출되므로 누설 전자기장의 세기는 인체에 무해한 수준에서 관리되어야 한다.

그밖에 크기, 가격, 충전시간, 환경 신뢰성 등의 문제는 수많은 기업들이 이미 개발 경험과 노하우를 충분히 갖추고 있으므로, 제품 난이도에 따라 기간의 차이는 있겠지만 연구개발과정을 거쳐 해결해 나갈 수 있을 것이다.

본 논문에서는 휴대폰 무선전력에 사용되는 교류 전자기장을 효과적으로 차폐하여 무선전력 전송 효율을 높이고 에너지 누설을 최소화 할 수 있는 전자기장 차폐재의 현황과 앞으로 전개될 기술의 방향에 대하여 소개하였다.

II. 전자기장 차폐 기본 원리와 응용

자유공간에 방사된 교류 전자기장 즉, 전자기파는 공기 중에서 전파되다가 다른 매질을 만나면 그 매질의 전기적 특성(투자율, 유전율, 전기전도도, 전기저항 등)에 따라 입사면에서 일부는 반사되고 매질 내에서 소실되며 또한 매질 밖으로 투과되게 나간다. 입사면에서 진입한 전자기장 에너지는 매질의 손실 특성에 따라 열에너지로 변환되어 흡수되거나 매질의 형상을 따라 진행하거나 혹은 매질의 다른 면으로 투과된다.

전자기파 차폐는 교류 전기장의 차폐와 교류 자기장의 차폐 두 가지로 분리하여 생각해 볼 수 있다. 교류 전기장이 비저항 0인 이상적인 전도체 표면에 입사되면, 그 내부에서는 전기장이 존재하지 않게 되어($V=IR$) 전기장의 차폐가 가능해진다. 한편 교류 자기장이 전도체 표면에 입사될 경우, 그 수직면 방향으로 맴돌이 전류가 발생하여 입사된 자기장을 상쇄시키는 2차적인 자기장을 만들어 차폐효과가 나타난다. 교류 자기장의 입사에 의해 전도체 내에서 발생하는 맴돌이 전류는 M. Faraday의 전자기 유도법칙에 의해 다음의 수식으로 표현할 수 있다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (1)$$

그러나 정자계 또는 100 kHz 이하의 저주파 자기장은 맴돌이 전류가 발생하지 않거나 매우 미약하여 입사된 자기장 세기가 클 경우, 이를 상쇄하지 못하므로 전도체만으로는 차폐가 불가능하게 되므로, 입사된 자기장을 소재 내에 대부분 속박시켜 높은 자속 밀도를 구현할 수 있는 연자성 소재(soft magnetic material)가 필요하게 된다.

이와 같이 전력 공급원으로부터 발생하는 방사성의 교류 전자기파를 다루는 기술은 크게 차폐와 흡수로 나누어 볼 수 있다. 차폐는 입사된 전자기장 또는 전자기파를 반사하거나 경로를 바꾸는 기술이므로 매질의 손실 특성과 무관한 반면, 흡수는 전자기 에너지를 매질 내에서 소모해야 하므로 매질의 큰 손실 특성이 요구된다. 반사파를 최소화하는 흡수 기술은 수백 MHz 이상의 대역에서 주로 활용되며 전파흡수체라고도 한다. 차폐효과(S_E)에 대하여 아래의 수식으로 표현할 수 있다.

$$S_E = \text{Reflection}(R_E + R_H + R_P) + \text{Absorption}(A_E + A_M) \quad (2)$$

R_E 는 전기장 반사, R_H 는 자기장 반사, R_P 는 평면파 반사, A_E 는 맴돌이전류 손실 항목이며, A_M 은 자기손실과 유전손실에 대한 parameter이다.

차폐효과를 높이려면, 응용제품의 특성에 따라, 반사와 흡수 중 어느 쪽에 비중을 둘 지 선택한 후 배정 가능한 차폐재 공간과 차폐 주파수 대역을 고려하여 차폐소재를 설계하게 된다.

III. 전자기장 차폐 소재

전자기장 차폐재로서 사용되는 연자성 재료는, 외부 교류 자기장의 위상변화에 따라 재료 내부의 자화 방향이 용이하게 반응하는 자성 재료로서, 현상적으로는 공간에 분포한 자기장을 재료 내부로 끌어들이어 높은 밀도의 자력선속을 갖는 자기회로를 형성하는 역할을 한다. 이때 자성소재의 투자율은 자력선속을 높이는 정도를 나타내는 지표로서, 높은 투자율의 연자성 재료를 사용하면 소재 주변에 분포한 자기장을 소재

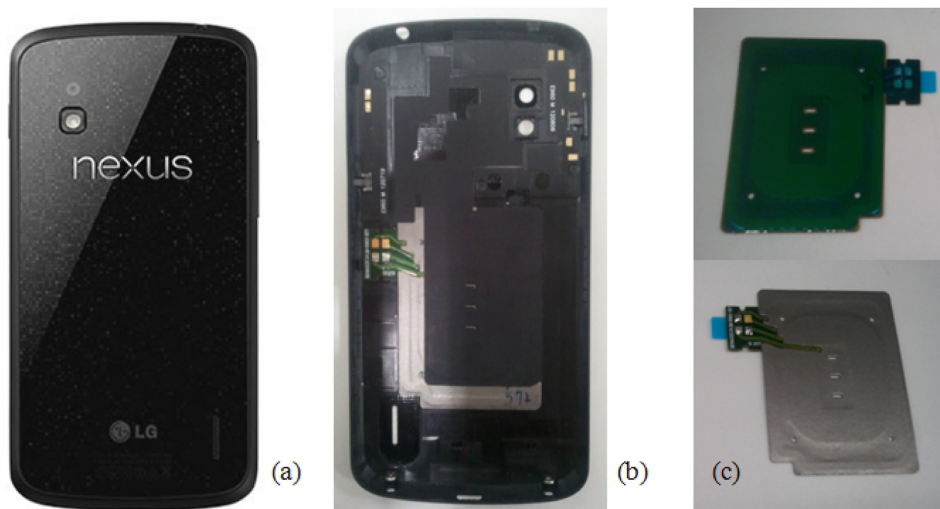


Fig. 1. (Color online) (a) Smart phone with on-board wireless power receiver, (b) inside view of it's rear case and (c) the world first released WPC-NFC combo module by LG Innotek.

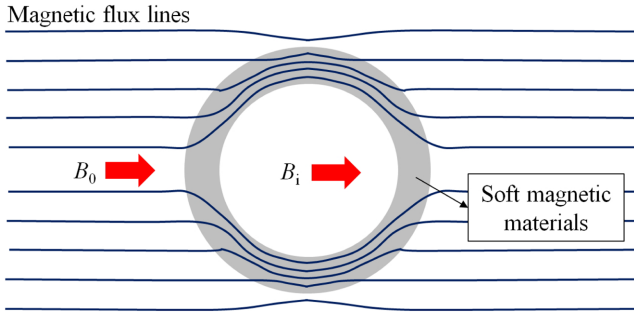


Fig. 2. (Color online) Distribution of magnetic flux lines in and around soft magnetic material.

내부로 대부분 끌여 들어 누설 자기장을 최소화시킨다.

연자성 재료는 연자성 합금, 연자성 Ferrite 소결체와 같이 단일 소재로 사용하거나, 연자성 금속분말 및 연자성 Ferrite 분말을 절연성 수지나 세라믹 혹은 비자성 금속 등과 혼합하여 압출, 프레스, 필름 캐스팅 등의 방법으로 성형한 복합 소재(composite) 형태로 사용되고 있다. 교류 자기장의 주파수에 따라 자기손실($\tan\delta$)을 3% 이내로 억제하면서 실제로 구현이 가능한 적정 투자율을 Fig. 3에 도시하였다. 소결체 Ferrite의 경우 100 MHz 이하에서는 spinel ferrite인 Mn-Zn계 ferrite와 Ni-Zn계 ferrite 소재가 사용될 수 있으며, 그 이상의 주파수에서는 Z-type이나 Y-type의 hexagonal 결정구조를 갖는 Ba 또는 Sr계 ferrite 등을 사용할 수 있다. Composite 소재의 경우 저주파 대역에서는 소결체 ferrite보다 투자율이 낮지만 자기손실이 적어 고주파 대역으로 갈수록 그 차이는 줄어들게 되고, 또한 1,000 °C 이상의 고온 소결 공정이 필요하고 취성이 큰 ferrite 소재에 비해 양산성이 우수하며, 자기적 특성의 열적 안정성, 고주파 특성 및 자기적/열적 이방성 제어의 용이함 등 여러 가지 차별화된 장점이 많으므로 다양한 분야에서 활발히 적용되고 있다.

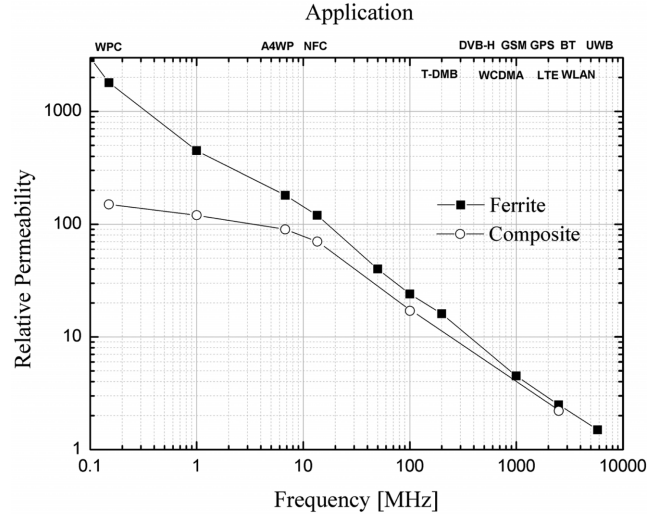


Fig. 3. Practically available relative permeabilities with magnetic loss $\tan\delta$ below 3% at the given frequency for the sintered soft ferrite and soft magnetic alloy-resin composite.

Table I에는 대표적인 대용량 전력회로용 연자성 소재의 자기적 특성을 나타낸다. 1 kHz 이하의 저주파에서는 전기강판(Silicon steel)과 Fe-Ni(Permalloy) 합금소재가 주로 사용되고 있으며, 수십~300 kHz 대역에서는 Mn-Zn ferrite와 Metglas 와 같은 비정질 합금(amorphous ribbon)이 사용되고, 그보다 높은 주파수에서 1 MHz 정도까지는 Finemet과 같은 나노 결정질 합금(Nanocrystalline ribbon) 사용된다. 이보다 높은 주파수에 대해서는 Zn/Ni과 Mn/Zn의 몰 비를 제어하고 열처리 공정을 통한 결정립 크기 미세화[3], 결정입계 부피 증가 등을 통하여 투자율을 적절히 감소시키고 자기손실을 낮게 억제할 목적으로 절연성 폴리머 및 세라믹 분말 등과 혼합해 복합소재화 하는 방법[4]이 사용된다. 금속계 연자성 소재는 Si함량을 제어하여 비저항, 자왜 상수를 제어하는 방법[5]과

Table I. Magnetic properties for the generally used soft magnetic materials [11-14].

Name	Composition	$\mu_{@100\text{kHz}}, \mu_i^*$	B_s (T)	T_c (°C)	H_c (Oe)	δ (g/cc)	ρ ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)
Ni-Zn ferrite	$\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1$)	15~1500	0.3~0.5	150~450	0.3~0.5	4.5~5.0	1014~15
Mn-Zn ferrite	$\text{Mn}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1$)	750~10 k	0.3~0.5	100~300	0.04~0.25	4.5~5.0	107~8
Silicon steel (Oriented)	$\text{Fe}_{97}\text{Si}_3$	800	1.8~1.9	750	0.4~0.5	7.65	45~50
Silicon steel (Non-oriented)	$\text{Fe}_{97}\text{Si}_3$	400	1.6~1.7	750	0.5~0.6	7.65~7.7	40~45
Super core	$\text{Fe}_{93.5}\text{Si}_{6.5}$	800	1.3	700	0.56	7.6	82
Fe powder	Fe	4~100	2.2	770	5~9	7.2	10
Permalloy	$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$	5 k*	0.7	450	0.3	8.5	60
High flux	$\text{Ni}_{50}\text{Fe}_{50}$	14~160	1.5	360	1	8	32
MPP	$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{14.35}\text{Mo}_{4.8}\text{Mn}_{0.5}\text{Si}_{0.35}$	12 k~200 k*	0.66~0.82	455	0.02~0.04	8.73	59
Sendust	$\text{Fe}_{85}\text{Si}_9\text{Al}_6$	26~125	1	740	0.5	6.15	85
FeSiCr	$\text{Fe}_{87}\text{Si}_{11}\text{Cr}_2$	20~70	1.2~1.4	740	1	6.5	110~120
Metglas 2605	$\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$	5 k*	1.56	399	0.4~0.6	7.32	130
Metglas 2714	$\text{Co}_{66}\text{Si}_{15}\text{B}_{14}\text{Fe}_4\text{Ni}_1$	10~15 k*	0.57	225	0.15~0.35	7.59	142
Finemet	$\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$	15 k*	1.23	570	0.01~0.03	7.3	110~120

Co를 첨가하여 자기 이방성 특성을 제어하는 방법[6], 결정립 미세화[7] 이외에 복합소재화[8]하여 고주파 특성을 개선하는 방법이 사용된다[9, 10].

비교적 저주파의 자기장(< 30 MHz)을 차폐할 때는 고투자율의 Ni-Zn ferrite, FeSiCr계, FeSiAl계로 구성된 복합소재를 사용하는 것이 추천되며, 용도에 따라서 전기장 차폐기능도 함께 구현할 목적으로는 FeSiAl보다 비저항이 높은 연자성 합금인 FeSiCr계가 유리하다고 알려져 있다.

IV. 무선전력전송 수신부 자기장차폐 소재

무선으로 전력을 전송하는 무선충전 시스템은, 송신부의 코일에서 발생한 110~205 kHz 범위의 교류 자기장에 의해 수신부의 코일에 전류를 유도시켜 이와 연결된 배터리에 전하를 공급하는 원리로 동작된다. 송신부에는 특정 전류범위에서 교류 자기장을 강하게 발생시키기 위하여 1 mm 두께의 투자율 2,400 정도의 MnZn ferrite소재가 자기장 차폐재로 사용되고 있으며, 수신부에도 금속소재인 배터리 케이스로 투과되는 자기장을 차단함으로써 수신부 코일에 유입되는 교류 자기장을 강화하여 전송효율을 높이고자 일반적으로 투자율 40~200, 두께 0.2~0.4 mm의 자기장 차폐재가 사용되고 있다. 휴대폰 배터리 등으로 누설된 자기장은 금속의 표면에서 맴돌이 전류를 발생시켜 열을 발생시키거나, 휴대폰의 각종 신호처리 회로부에 전자기장 간섭을 야기하여 오동작을 일으킬

수 있다.

무선전력전송 현상을 수식으로 표현하면 다음과 같다. 유도 전압 v 는 전도체를 투과하는 자기장이 시간에 따라 변화할 때 발생하는 것으로 전도체의 인덕턴스 값에 비례하게 된다. 이를 무선전력전송 시스템에 도입하면 수신부 코일에 유도되는 전압 v_{Rx} 은 수신부 코일의 인덕턴스 L_{Rx} 와 수신부-송신부 코일간의 상호 인덕턴스 M 에 의해 결정된다. 수신부에는 유도전압에 의한 전류 이외에 자체 전력원에 의한 전류성분이 없다고 가정하면 $di_{Rx}/dt = 0$ 되므로 수식을 M 에 대하여 다시 정리하면 자기유도결합계수 k 와 수신부 및 송신부 코일의 자기인덕턴스 값에 의해 결정된다.

$$v = L \frac{di}{dt} \tag{3}$$

$$v_{Rx} = L_{Rx} \frac{di_{Rx}}{dt} + M \frac{di_{Tx}}{dt} = M \frac{di_{Tx}}{dt} \Big|_{\frac{di_{Rx}}{dt} = 0} \tag{4}$$

$$M = k \sqrt{L_{Tx} L_{Rx}} \tag{5}$$

여기서 L , L_{Rx} , L_{Tx} , M , k 인자는 각각 인덕턴스, 수신부 안테나 코일의 자기인덕턴스, 송신부 안테나 코일의 자기인덕턴스, 송신부-수신부 사이의 상호인덕턴스, 송신부-수신부 안테나 코일간 자기유도결합계수이다. 수식들의 관계에서 알 수 있는 것처럼, 무선전력 전송효율을 높이는 한가지 접근방법은

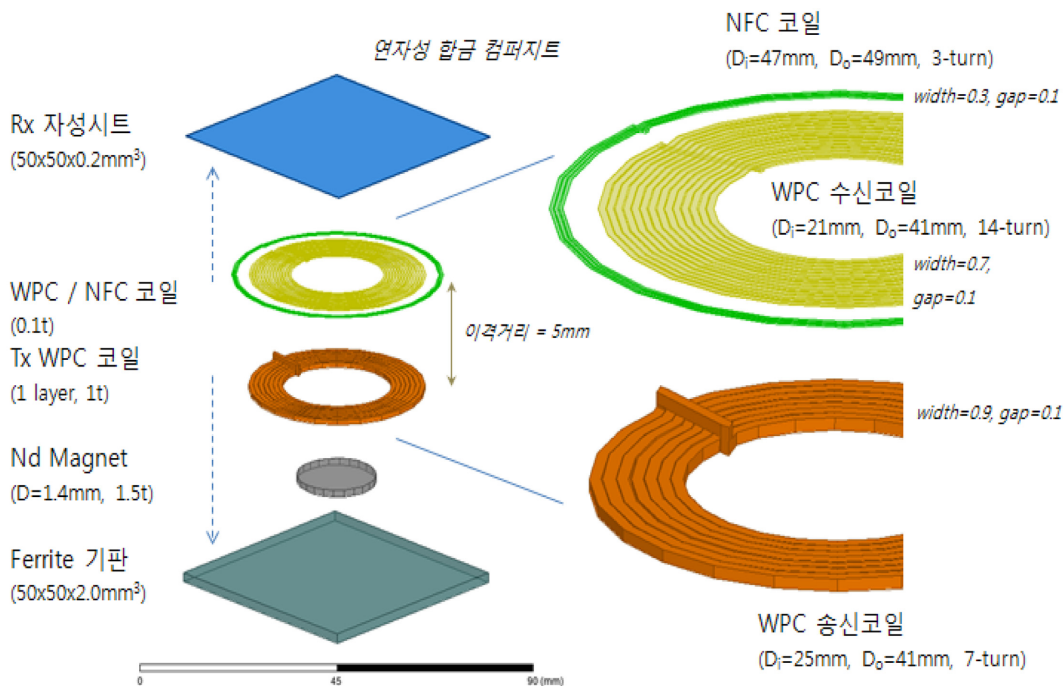


Fig. 4. (Color online) Dimension and structure of the coils and magnetic materials on the receiver and transmitter for the electromagnetic field simulations.

k 와 L_{RX} 를 증가시켜 송신부-수신부 코일간의 상호 인덕턴스를 높임으로서 수신부 코일에 유도되는 전압을 높이는 것이다. 참고로 L_{TX} 는 WPC A1 송신규격에서 $24 \mu\text{H}$, A11에서는 $6 \mu\text{H}$ 정도의 값으로 고정되어 있으며, 송신부-수신부 코일 사이에는 5 mm의 간격이 존재한다. 높은 상호인덕턴스 M 을 얻기 위해서는 k 와 L_{RX} 를 증가시키면 되는데, k 와 L_{RX} 를 증가시키는 방법은 높은 투자율과 낮은 손실을 가지며 허락되는 설계한도에서 가장 두꺼운 자기장 차폐 시트를 수신부의 코일의 기관으로 적용하면 된다. 그런데 L_{RX} 값을 증가시키면 직렬 연결된 capacitor의 용량을 낮추어 수신 코일의 공진주파수를 동작주파수 범위에 있도록 조정하는 것이 필요하다. 또한 수신부 코일에서 발생한 공진현상을 감지하기 위해 병렬적으로 연결된 Capacitor의 용량도 함께 조정되어야 한다. 자세한 방법과 정보는 Qi의 설계 권고안[15]을 참조하면 된다.

투자율 변화에 따른 전송효율 거동에 대해 송신부-수신부 코일로 구성된 무선전력 전송부를 Fig. 4와 같이 모델링 하였고 3차원 유한 요소법으로 전자기장을 시뮬레이션(적용 주파수: 150 kHz)하여 해석한 결과를 Fig. 5와 6에 도시하였다.

낮은 범위에서 투자율이 증가하면 자기유도결합계수 k 가 급격히 증가하다가 투자율 50 이상에서는 그 증가율이 둔화되는 것을 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 투자율 200에 이르면 k 는 0.77 정도로 포화되는 거동을 보이며 0.23에 해당하는 누설률은 송신부-수신부 코일 사이의 이격 공간으로 인한 영향이라고 판단된다. 한편, 금속 케이스로 구성된 배터리가 자기장 차폐 시트의 뒷면에 부착되었을 때는 투자율 30 이하에서 k 가 급격히 감소함을 볼 수 있다. 즉, 차폐시트 뒤쪽으로 누설된 자기장에 의해 배터리 금속케이스 표면에서 맴돌이 전류가 생성되어 상쇄 자기장을 발생시키거나 에너지가 소실됨

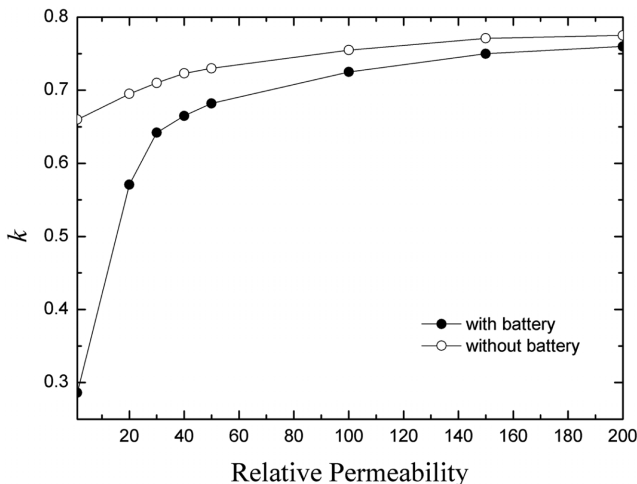


Fig. 5. Dependence of Magnetic coupling coefficient k on the relative permeability of 2 mm-thick soft magnetic composite with or without battery.

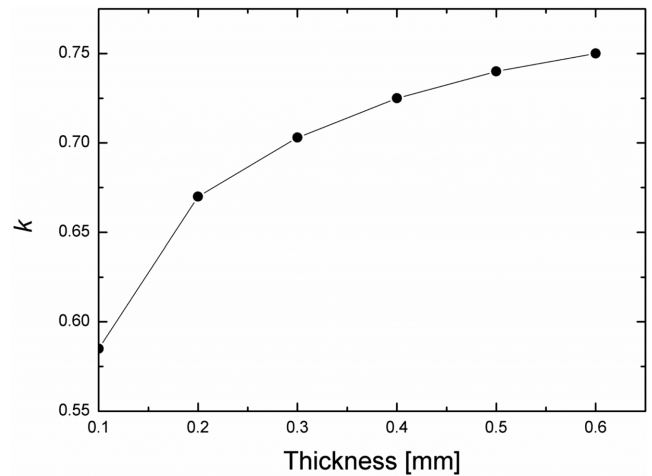


Fig. 6. Dependence of k on the thickness of soft magnetic composite with relative permeability fixed to 50.

을 의미하고 있다.

투자율을 50으로 고정하고 자기장 차폐 시트의 두께가 증가할 때 k 의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 차폐 시트의 두께가 두꺼워지면 한계치 0.75 정도로 포화됨을 알 수 있으며, 이것은 앞에서의 투자율에 대한 k 의 전산모사 결과와 일치하고 있다.

자기장 차폐 시트의 투자율 혹은 두께가 증가하면 L_{RX} 이 증가하게 되고 그 결과 M 이 증가한다. 이와 같이 k 와 L_{RX} 의 증가는 차폐 시트의 자성물성에 의존하게 된다. 코일 면적이 고정되었다면 투자율이 높은 차폐시트를 사용했을 때는 수신부 코일이 적은 회전수(turns)로도 투자율이 낮은 시트를 적용했을 때와 동일한 L_{RX} 를 얻을 수 있으므로 저항이 감소되는 효과를 얻을 수 있고, 보다 얇은 두께로 동일한 L_{RX} 를 구현하는 것이 가능해진다. 즉, 투자율이 높은 소재를 적용했을 때, 수신부 안테나 모듈 설계의 자유도가 매우 높아진다고 할 수 있다. 단, 이때 자기 손실값은 최대한 낮을수록 좋다.

차폐 시트의 자기손실을 낮게 유지하지 못하면, 교류 자기장은 자성시트 내에서 열에너지로의 손실에 따라 발열이 일어나게 된다. 이것은 Fig. 7과 같이 복소 투자율(complex permeability)의 허수항을 측정하면 그 정도를 확인할 수 있다. 더 정확한 방법으로는 코어 손실(core loss)을 측정하여 비교하는 방법이 있다.

코어손실(P_{Loss})은 아래의 수식(6)~(9)과 같이 히스테리시스 손실(P_H)와 와전류손실(P_E), 잔류손실(P_R)의 합으로 표현될 수 있으며 단위는 watt/cc 이다[16]. P_H 와 P_E 는 아래의 수식에 좀 더 자세히 정의되어 있다. K_H 와 K_E 는 상수항이며, B 는 자속밀도, d 는 단면적, ρ 는 전기 비저항, f 는 주파수를 의미한다.

$$P_{Loss} = P_H + P_E + P_R \tag{6}$$

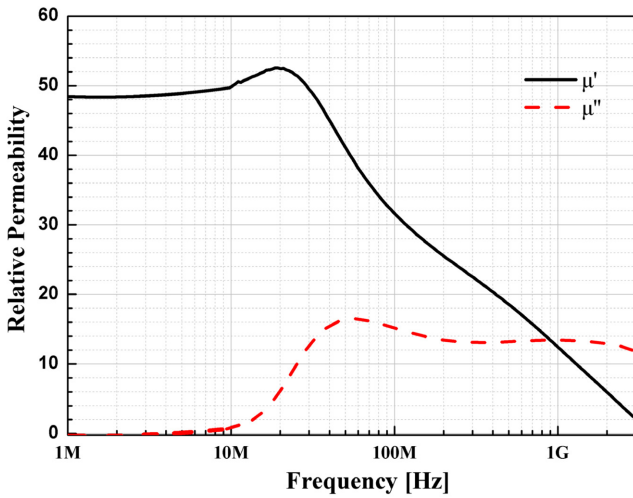


Fig. 7. (Color online) Relative permeability spectrum for the soft magnetic alloy-resin composite sheet (LGIT EMB-C-W).

$$P_H = K_H B^2 f \tag{7}$$

$$P_E = \frac{K_E d^2 B^2 f^2}{\rho} = \frac{K_E B^2 f^2 D}{R_{G,B}^{mic}} = \frac{K_E B^2 f^2 DL}{\rho_{G,B}^{mic} \delta_{G,B}} \tag{8}$$

$$P_R = f(\text{domain wall damping, spin damping}) \tag{9}$$

Ferrite의 경우 P_H 는 자구벽(magnetic domain wall) 이동에 대한 방해 때문에 생기는 손실로서, 이를 낮추기 위해서는 K_H 와 연관되는 자기이방성 상수(K_1), 자왜(magnetostriction), 내부 또는 외부에 축적된 기계적 응력, 내부의 기공 및 불순물 등의 결함 등을 최소화 해야 한다. 따라서 기공이 없는 고밀도, 큰 결정립과 얇은 결정입계를 갖는 미세구조를 구현함으로써 낮은 P_H 를 보이게 된다. 이에 비하여 P_E 를 낮추기 위해서는 전기 비저항을 높이거나 결정립의 크기를 작게 하는 방법[7-9] 등이 사용되고 있다. 기본 투자율에 대한 부분은 ferrite 조성중의 Ni/Zn 혹은 Mn/Zn의 몰 비를 제어하거나 소결조건을 이용하여 결정립 크기와 형상을 제어하는 고전적인 방법[17]을 사용하여 조정할 수 있다.

이에 비하여 복합 소재(composite)의 경우, P_H 는 금속입자의 표면 제어와 응력제거 열처리를 통해 보자력을 낮추고, 산소 함유량 제어 및 금속입자와 수지 사이의 계면 에너지 제어 등의 방법을 사용하고, P_E 는 금속 입자의 크기, 두께 제어와 합금 조성 설계 등을 통해 비저항 증가 및 절연층 코팅 등의 방법을 사용하여 최적화하도록 관리하고 있다.

전산모사 결과에 의하면 출력 3~5 W일 때 무선전력 전송 시스템의 자기장 차폐 시트에 존재하는 자속밀도는 10~100 mT 정도인데, 외부 인가 자기장을 150 kHz, 50 mT 조건으로 할 때 composite과 ferrite의 코어 손실은 각각 300~400

mW/cc와 200~400 mW/cc 정도의 값으로 측정되고 있다. 이 때 composite는 ferrite 보다 코어 손실이 약간 높은 편이지만 열전도도가 높으므로 방열특성이 우수하여 온도 상승 효과가 낮은 것으로 나타나고 있다. 차폐시트의 코어 손실에 의한 손실 전력은 아래의 Legg's 수식[18]을 통해 계산할 수 있다.

$$R_{ac} = \mu L(\text{core loss}) = \mu L(aB_{max} \cdot f + Cf + ef^2) \tag{10}$$

$$\text{watt of Loss} = 3.98B_{max}^2 Al(\text{core loss}) \times 10^{-9}$$

$$= 3.98B_{max}^2 Al \left(\frac{R_{ac}}{\mu L} \right) \times 10^{-9}$$

여기서 R_{ac} , μ , L , a , B_{max} , C , e , f , A , l 인자는 각각 코어 손실에 의한 실효저항(Ω), 투자율, 인덕턴스, 히스테리시스 손실 계수, 최대 자속밀도(gauss), 잔류 손실 계수, 와전류 손실 계수, 주파수, 코어 단면적(cm^2), 평균 자로 길이(cm)이다.

Ni-Zn Ferrite나 연자성 금속 composite를 전자기장 차폐재로 사용하여 제작한 휴대폰용 무선전력 전송시스템의 경우 차폐재와 수신(R_x) 안테나의 두께와 면적에 따라 WPC Tx-A1 기준으로 55~70%, Tx-A11기준으로 65~74% 정도의 시스템 무선전력 전송효율을 구현할 수 있다. 무선전력전송 시스템의 효율은 시스템을 구성하는 모든 안테나, 회로, 각종 부품, 및 차폐재가 갖는 각각의 효율을 함께 고려하여 예측할 수 있으며, 수신(R_x) 회로와 안테나의 효율, 송신(T_x) 회로와 안테나의 효율, 수신(R_x) 차폐재의 효율, 송신(T_x) 차폐재의 효율을 모두 곱하여 무선전력전송 시스템 전체의 효율 값을 예측할 수 있다. 즉, 수신(R_x) 회로의 효율 0.92와 송신(T_x) 회로의 효율 0.92, 수신(R_x)과 송신(T_x) 안테나의 효율 0.95, 송신(T_x) 차폐재의 효율을 1이라고 가정하고 수신(R_x) 차폐재 효율을 0.85~0.95로 변화시킬 때, 시스템의 무선전력전송 효율은 64.9~72.6% 범위를 갖게 된다.

V. WPC-NFC 전자기장 차폐재의 현재와 미래

현재 개발된 소재 기술로, 연자성 금속 composite 혹은 ferrite 소결체에서 무선전력 전송에 적합한 투자율과 자기손실을 구현하는 것이 가능한데, 이들 각각의 성능을 Table II와 같이 비교할 수 있다. Near field communication(NFC)에 대해서는 13.56~16 MHz 주파수 대역에서 높은 투자율과 낮은 자기손실 특성이 요구되지만, 태그와 리더간 NFC통신이 가능한 최대 인식거리와 전자결제에 필요한 EMVCo(Euro-pay, Mastercard and Visa; EMV 보안인증 플랫폼을 관리하는 국제 신용카드사 연합체) 인증을 통과하기 위한 특성이므로 투자율을 무조건 높게 하거나 자기손실을 무조건 낮게 하도록

Table II. Performance comparison of the currently used soft magnetic materials for wireless power and NFC.

Material	자기유도 방식		자기공진 방식	NFC 성능	상대가격	기타
	A1	A11				
연자성 금속-레진 composite	상	상	상	상	120	열전도도 中, 양산성 우수
Ferrite	Ni-Zn ferrite	중	상	상	100	열전도도상 低, 제조 난이도 中
	Mn-Zn ferrite	상	상	중	200	열전도도 低, 제조 난이도 高

특성을 관리하지는 않는다. 즉, 인증을 통과할 수 있을 정도의 특성 관리만으로도 충분하며, 정량적으로는 대략 투자율 30~150, 자기손실(tanδ) ≤ 5% 정도에서 관리되고 있다.

Composite와 Ni-Zn ferrite는 WPC 송신규격 A1을 제외하면 유사한 성능을 보이며 양산공정의 안정화가 많이 진행된 Ni-Zn ferrite가 상대적으로 가격이 낮게 형성되어 있다. Ni-Zn ferrite는 최근 2년 사이에 업체간 경쟁이 심화되어 가격이 50% 이상 급락한 상황이므로 추가 가격의 인하 폭은 크지 않을 전망이다. 국내시장은 (주)아모LED, 마루와, 토다이수(주), (주)EMW, 삼화전자(주) 등이 경쟁하고 있는 상황이며, SKC가 2013년 4월경 양산을 시작할 예정이다. 이에 비교하여 composite는 Google의 Nexus IV를 통하여 최초로 양산 적용된 무선충전-NFC 안테나 모듈 제품으로서 추가적인 가격인하 가능성이 ferrite보다는 큰 상황이므로 2013년 하반기에는 Ni-Zn ferrite와 유사한 가격대를 형성할 것으로 예상된다. 양산공정 구축을 위한 투자비가 ferrite 생산공정과 비교하여 상대적으로 소규모이므로 현재 많은 업체들이 신규사업 참여 혹은 검토하고 있는 중인데, composite 시트의 경쟁력은 연자성 금속분말 설계 기술이 핵심이기 때문에, 이러한 관점에서 차별화된 경쟁력을 갖춘 업체는 거의 없는 상황이다. 대부분 업체들은 일본 메이트(Mate)社 등에서 가공된 자성분말을 높은 가격으로 수입하여 복합소재 시트 공정을 거쳐 제작되므로 기술적 및 가격적으로 차별화된 경쟁력을 기대하기는 어렵다. 현재, LG이노텍과 창성의 계열사인 동현전자가 원재료 조성부터 설계 및 제조관리 된 자성분말을 사용한 composite를 양산 대응하고 있다.

일본의 파나소닉 시스템 네트워크사에 의해 개발된 Mn-Zn ferrite시트는 무선충전 전용으로 개발되었으며, 투자율이

1,800~1,900으로 높은 수준이지만 NFC 동작주파수 대역에서 통신 성능은 보증하기 어려운 상황이다. 파나소닉社가 인수한 산요社에서 제작한 스마트폰에 해당 제품이 채용되어 일본 내에서 출시되고 있다. 무선충전 수신 안테나 모듈의 단가 인하도 급속히 진행되고 있으며, 이에 따라 재료비의 30~40%를 차지하는 자기장 차폐 시트의 단가 인하 압력도 거세어지고 있다.

최근에는 Ni-Zn ferrite 시트 위에 FeSiB계 비정질 리본을 적층한 샘플을 조심스럽게 소개한 기업도 있다. 이것은 hybrid 형태의 제품으로 A1 효율은 composite 대비 저조하지만, A11 성능을 개선할 수 있다. 하지만 NFC 대역에서 손실이 급증하는 금속계 연자성 리본이 NFC 성능을 떨어뜨릴 수 있는 점과 공정이 까다로운 추가 자재의 사용에 의한 가격 상승은 극복해야 할 문제이다.

앞으로 무선전력전송 관련 시장의 개화가 기대되는 5년 뒤에는 전자기장 차폐 소재에서는 어떤 변화가 가능할지 Table III에 예상하여 보았다. Composite와 Ni-Zn ferrite 시트는 여전히 경쟁구도일 것이며, 양산성 측면에서 볼 때 ferrite보다 composite가 유리하므로 composite 쪽이 좀 더 경쟁력이 있을 것으로 예상된다. 또한 1~3 m 광폭으로 roll-to-roll 방식의 연속 생산이 가능한 composite의 경우 안테나 코일 부위를 조립할 때 기존 batch 생산방식에서 roll-to-roll 자동생산으로 전환이 가능해지므로 양산업체들은 composite를 선호하게 될 것이다. 설계적인 부분에도 composite는 코일 매립형 구조 등을 통한 두께 감소, 적층 가능, 자체 유연성(flexibility) 등의 많은 장점을 갖추어 설계 자유도가 높으므로 수신부에서 Ni-Zn ferrite 시트는 점차 composite로 대체 될 것이다.

Table III. 미래에 사용될 무선전력 모듈관련 전자기장 차폐용 연자성 소재의 성능 비교

Material	자기유도 방식		자기공진 방식		상대가격	기타
	Mid power	High power	Mid power	High power		
연자성 금속-레진 composite	상	상	상	상	80	열전도도 中, 양산성 우수
Ferrite	Ni-Zn ferrite	중	중	상	100	열전도도 低, 제조 난이도 中
	Mn-Zn ferrite	상	상	중	120	열전도도 低, 제조 난이도 高
연자성 금속	비정질계	상	상	하	120	열전도도 高, 제조 난이도 高
	나노결정질계	상	상	하	200	열전도도 高, 제조 난이도 高

무선충전 전용으로는 Mn-Zn ferrite 시트와 비정질계 혹은 나노결정질계의 연자성 금속이 유력한 후보가 될 것이며 composite와 비교하여 가격경쟁력을 갖추게 될 때 시장에 진입할 수 있을 것이다. 최근 히타치 금속사에서 Finemet 리본을 이용하여 개발한 WPC용 차폐 제품을 공개하였고, Vacuumschmelz社 역시 Vitroperm 을 응용한 차폐재를 시장에 소개하고 있다. 무선충전 응용제품이 3~4 W급의 스마트폰에 국한되지 않고 5 W 이상의 중급 전력과 100 W 이상의 대전력 전송으로 확산될 때 차폐재의 코어 손실과 열전도도 특성은 매우 중요한 의미를 갖게 되므로 이와 같은 금속계 리본 제품은 가격만 ferrite보다 저렴하다면 차별화를 이룰 수 있다. 따라서 향후 전자기장 차폐재의 개발방향은 세가지로 정리해 볼 수 있다. 즉, 낮은 코어 손실, 높은 열전도도 특성과 함께 중급 전력 및 대전력 응용제품에서는 보다 넓은 차폐 면적을 필요로 하게 되므로 현재(USD 150~200/m²)보다 낮은 가격(≤USD 100/m²)이 필수적이 된다.

VI. 기타 전자기장 차폐 소재 응용 분야

먼저 전장용 차폐재를 신규 응용분야로 들 수 있다. 최근 자동차에는 운전자의 편의와 안전성을 높이고자, 다수개의 CAN 통신기기, 안전 및 제어장치, 유무선통신기기, 이동통신매체, DC 모터 구동기 등 다양한 전기·전자 장치가 높은 집적도로 내장되어 있으며 장치간 연결에 무선통신을 이용한 연결방식이 서서히 적용되고 있다. 그러나 이러한 무선 통신 방식은 신호전달 과정에서 목적하지 않은 장치에 전자파 간섭을 야기할 가능성이 있으며 차량 내부 공간의 전자기파 강도를 높이므로 적절한 차폐가 중요기술로 등장하고 있다. 마찬가지로 20~40 kV의 고전압으로 동작하는 점화플러그에서 발생하는 저주파 전기장에 대한 차폐도 고려되어야 할 부분이다.

한편 주행시 전후방 차량의 유무 및 이격 거리, 속도를 인식하여 충돌예방 기능과 자동주행을 위한 탐지기 역할로서 차량 레이더가 탑재되고 있다. 또한 자동 주차 기능을 구현하기 위하여 역시 거리탐지 레이더 기술이 응용되고 있으며, 이러한 레이더의 주파수로는 77 GHz가 유력하며[19] 레이더 모듈 내에는 다수개의 배열안테나와 함께 전파흡수체를 사용하는 구조가 일반적이다. 전파흡수체는 레이더의 뒷면으로 방사되는 back lobe를 감소시키는 기능을 한다.

전자펜(Digitizer)용 자기장 차폐재는 전자기펜을 이용하는 터치 인식 시스템의 필수 구성 요소이다. 전자기 펜에서 발생하는 500 kHz대의 전자기 신호를 반사시켜 신호 인식을 용이하게 하는 역할을 한다. 주로 Sendust계의 연자성 composite 시트가 사용된다.

자기공진 방식의 무선전력 전송모듈에서는 자기공진 현상을 통해 수십cm~1 m 정도의 증가된 거리에서 무선전력 전송이 가능하지만[20], 거리에 따른 효율 감소와 특정 방향으로의 무선전력 전송을 원할 때 증계기 역할을 해주는 repeater가 필요하다. 여기에 다양한 응용상품들이 출현할 가능성이 높으며 박형의 필름 형태로 가공이 용이한 composite의 적용이 기대되고 있다.

기타 전자제품으로는 외부 전자기파 입사에 따른 간섭 내성이 취약한 고가의 의료기기(MRI) 및 실험용 장비의 경우 전자파 간섭에 따른 설계 및 대책이 충분하지 않은 상태가 대부분이므로 장비의 오동작을 방지하기 위한 전자기파 차폐가 필요하다.

전자파 도청(TEMPEST)은 고성능의 안테나를 통해 키보드 타이핑으로 발생하는 미약한 전자기파를 수신하여 그 패턴을 문자정보 형태로 분석하고 데이터베이스화 함으로서 비밀번호, 기밀문서 등 보안이 필요한 내용을 원격지에서 획득할 수 있는 기술[21]이다. 이렇게 고도의 보안이 요구되는 곳에서 전자기파 흡수체가 사용되어야 한다.

현대 전자전에서의 가장 위협적인 무기 중 하나인 전자기 펄스 폭탄(electromagnetic pulse bomb), 약칭 EMP 폭탄은 폭발 시 광대역의 강한 전자기파를 발생시켜 주변의 모든 반도체 회로와 기록 정보를 전자기 유도현상에 의한 강력한 전압 인가에 의해 물리적으로 파괴하므로 주요 군사시설과 정보시설, 병원 등에 EMP 방호는 필수적이다[22]. 저주파부터 고주파, 방사선 대역에 이르기까지 현대대에 한정된 우수한 차폐기능을 갖는 각각 차폐재를 복층으로 적층하여 구성하면 효율적 차폐가 가능하게 되며 군수분야와 함께 민간분야로의 시장확대가 예상되고 있다.

참고문헌

- [1] N. Tesla, US Patent 1119732 (1914).
- [2] <http://olev.kaist.ac.kr/>.
- [3] H. Su, H. Zhang, X. Tang, and Y. Jing, J. Appl. Phys. **103**, 093903 (2008).
- [4] M. Amano and Y. Kotsuka, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **51**, 238 (2003).
- [5] R. M. Bozorth, Ferromagnetism, IEEE Press, New York (1993) pp. 74~95.
- [6] K. Saito, H. S. Park, D. Shindo, and Y. Yoshizawa, J. Magn. Mater. **305**, 304 (2006).
- [7] Y. Yoshizawa, S. Oguma, and K. Yamaguchi, J. Appl. Phys. **64**, 6044 (1988).
- [8] H. Shokrollahi and K. Janghorban, J. Mater. Process. Tech. **189**, 1 (2007).
- [9] A. Makino, T. Hatani, Y. Naitoh, T. Bitoh, A. Inoue, and T. Masumoto, IEEE Trans. Magn. **33**, 3793 (1997).

- [10] M. E. McHenry and D. E. Laughlin, *Acta Mater.* **48**, 223 (2000).
- [11] <http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/electrical/supercore/index.html>.
- [12] http://www.metglas.com/products/magnetic_materials/2605SA1.asp.
- [13] http://www.metglas.com/products/magnetic_materials/2714A.asp.
- [14] http://www.hitachi-metals.co.jp/e/prod/prod01/p01_61.html.
- [15] <http://www.wirelesspowerconsortium.com/developers/specification.html>.
- [16] M. Drogenik, A. Znidarsic, and I Zajc, *J. Appl. Phys.* **82**, 333 (1997).
- [17] T. Nakamura, *J. Appl. Phys.* **88**, 348 (2000).
- [18] Victor E. Legg, *Bell System Technical Journal* **15**, 39 (1936).
- [19] J. Hasch, U. Wostradowski, R. Hellinger, and D. Mittelstrass, *Proceedings of the 8th European Radar Conference, Manchester, UK, October 12-14*, 101 (2011).
- [20] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, *Science* **317**, 83 (2007).
- [21] A. Auddy and S. Sahu, *Proceedings of the 10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility, Bangalore, India, November 26-27*, 603 (2008).
- [22] D. Nitsch, M. Camp, F. Sabath, J.-L. ter Haseborg, and H. Garbe, *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility* **46**, 1 (2004).

Electromagnetic wave Shielding Materials for the Wireless Power Transfer Module in Mobile Handset

Seok Bae*, Don-Chul Choi, Soon-Young Hyun, and Sang Won Lee

Applied Materials Lab., LG Innotek Components & Material R&D Center, Ansan 426-791, Korea

(Received 29 March 2013, Received in final form 8 April 2013, Accepted 9 April 2013)

Currently, wireless power transmission technology based on magnetic induction was employed in battery charger for smart phone application. The system consists of wireless power transmitter in base station and receiver in smart phone. Size and thickness of receiver was strictly limited in the newest smart phone. In order to achieve high efficiency of a tiny small wireless power receiver module, sub-millimeter thick electromagnetic wave shielding sheet having high permeability and Q was essential component. It was found that magnetic field from transmitter to receiver can be intensified by sufficient shielding cause to minimize leakage magnetic flux by those magnetic properties. This leads to high efficiency of wireless power transmission and protects crucial integrated circuit of main board from electromagnetic noise. The important soft magnetic materials were introduced and summarized for the current small-power wireless power charger and NFC application and mid-power home appliance and high-power automotive application in the near future.

Keywords : wireless power transmission, wireless charger, electromagnetic wave shielding