

메타물질 Slab이 포함된 자계 결합 무선 전력 전송 시스템 효율 요소 분석

Analysis of Elements for Efficiencies in Magnetically-Coupled Wireless Power Transfer System Using Metamaterial Slab

김 건 영 · 오 택 규* · 이 범 선

Gunyoung Kim · TaekKyuh Oh · Bomson Lee

요 약

본 논문에서는 자계 집속을 위해 메타 물질 slab을 포함하는 무선 전력 전송 성능을 공진기의 유효 Q-factor와 결합 계수 예측식을 사용하여 요소적으로 분석하였다. 구체적으로, 메타 물질이 갖는 손실을 고려한 등가회로를 제안하고, 이를 이용하여 무선 전력 전송 시스템을 분석하였다. 손실이 없는 이상적 또는 저손실 메타 물질이 시스템에 삽입될 경우, 음의 투자율로 인한 자계 집속으로 인해 전송 효율이 대폭적으로 개선될 수 있다. 하지만 음의 투자율을 구현하기 위해 RR (Ring Resonator) 또는 SRR(Split Ring Resonator)로 메타 물질을 설계할 경우, 구조에 의한 손실로 효율 증가에 악영향을 끼치게 된다. 점 자하 소스가 아닌 실제의 루프 공진기에 손실이 있는 메타 물질을 사용하여 전송 효율을 향상 시키기 위해서는, 메타 물질의 폭을 송수신 공진기 간 거리의 반 이하에서 최적화하여야 한다. 손실 탄젠트가 0.001인 메타 물질이 두 공진체 사이에 삽입되었을 때는 그 폭과 두 공진기 사이의 거리의 비가 약 0.35일 때 전송 효율이 93 % (메타물질 사용하지 않은 경우는 53 %)로 최대가 되었으며, 손실 탄젠트가 0.2(실제 손실과 유사)를 갖는 메타 물질이 삽입될 경우, 그 비가 약 0.25에서 약 61 %의 최대 전송효율을 나타내었다.

Abstract

In this paper, the effects of a metamaterial slab with negative permeability in a magnetically coupled wireless power transfer system (WPT) in the overall performance are analyzed quantitatively in terms of the effective quality factors of the loop resonators and coupling coefficient considering the slab losses, based on an equivalent circuit. Using the ideal metamaterial slab(lossless slab), the WPT efficiency is improved considerably by the magnetic flux focusing. However, the practical lossy slab made of RRs or SRRs limits the significant enhancement of WPT efficiency due to the relatively high losses in the slab consisting of RRs or SRRs near the resonant frequency. For the practical loop resonator, other than a point magnetic charge, using the practical lossy metamaterial slab in order to improve the transfer efficiency, the width of the slab needs to be optimized somewhat less than the half of the distance between two loop resonators. For the low-loss slab with its loss tangent of 0.001, the WPT efficiency is maximized at 93 % when the ratio of the slab width and the distance between the two resonators is approximately 0.35, compared with 53 % for the case without the slab. The efficiency in case of employing the high-loss slab(loss tangent: 0.2) is maximized at 61 % when the slab ratio is 0.25.

Key words: Efficiency, Flux Focusing, Magnetic Coupling, Metamaterial, Wireless Power Transfer

「이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2013R1A2A2A01015202).」

경희대학교 전자·전파공학과(Department of Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University)

*한국기계전기전자시험연구원 통신기술평가센터(Telecommunication Technology Center, Korea Testing Certification)

· Manuscript received March 5, 2014 ; Revised September 17, 2014 ; Accepted September 23, 2014. (ID No. 20140305-029)

· Corresponding Author: Bomson Lee (e-mail: bomson@khu.ac.kr)

I. 서 론

최근 통신 신호뿐만 아니라, 전력을 무선으로 전송하기 위한 연구들이 매우 활발히 진행되고 있다^{[1]~[4]}. 특히, 자계 결합 무선 전력 전송에 관한 연구가 다방면으로 이루어지고 있는데, 낮은 효율로 인한 문제점이 있다. 이는 두 공진기 간 결합 계수가 거리에 따라 급속히 줄어드는 자연 현상에 기인한다. 이를 극복하기 위해 중계 코일^[2] 또는 음의 유효 투자율을 가지는 메타물질^{[3],[4]}을 이용하여 전송효율을 향상시키기 위한 연구들이 진행 중이다.

메타 물질은 thin wire(음의 유전율), spilt ring resonator(음의 투자율)을 이용하여 구현할 수 있으며, 유효 유전율과 유효 투자율이 모두 음인 물질을 이용하여 입사되는 전자파를 집중시킬 수 있다^[5]. 또한, 유사 정전기장에서는 음의 유전율, 유사 정자기장에서는 음의 투자율 만을 이용하여 전기장과 자기장을 집중시킬 수 있다. 하지만 실제 구조에서는 구조적 특성으로 인한 손실과 메타 물질이 실질적으로 가질 수 있는 크기의 제한으로 인해 파의 집중이 완벽히 이루어질 수 없다^[6]. 참고문헌 [3]에서는 double-side spiral 구조를 이용한 메타 물질을 두 공진체 사이에 삽입하여 설계 주파수 27 MHz, 거리 50 cm에서 약 17 %에서 47 %로 전송 효율을 향상시켰다. 참고문헌 [4]에서는 ring resonator 구조를 이용한 메타 물질을 두 공진체 사이에 삽입하였다. 이 때, 시스템의 설계 주파수 13.56 MHz, 두 공진체간 거리 24 cm, 12 cm 두께로 삽입된 메타 물질의 손실로 인하여 상당한 자계 집중의 효과가 있음에도(자계 결합 계수의 증가에도) 불구하고, 오히려 전송 효율이 32 %에서 약 20 %로 감소한 것으로 보고된 바 있다. 이때는, 참고문헌 [5]에서와 같이 점 자계 소스를 가정하여 두 공진기 간 거리의 반을 slab 두께로 효율을 평가한 것이다.

본 논문에서는 실제의 루프 공진기가 점 자하 소스가 아님으로 해서 일어나는 영향과 삽입된 메타 물질 slab의 손실을 정량적으로 고려하기 위해 적절한 등가회로를 제시하고, 메타 물질의 손실 탄젠트 값과 메타 slab의 폭이 전송 효율에 미치는 영향을 요소적으로 분석하였다. 또, 두 공진기 간에 중계기를 삽입하여 효율을 평가하고, 상대적 비교를 함으로써 비교 우위를 논한다.

II. 모델링 및 분석

그림 1은 정자장(magnetostatic) 현상에서 점 자하로부터 발생한 자계가 음의 투자율을 갖는 물질(slab)을 통과하여 굴절되는 모습을 보여준다. 이 때, d 는 두 공진체 간의 거리, a 와 b 는 송수전 공진체로부터 slab까지의 거리 $s(a' + b')$ 는 slab의 두께이고, θ_1 과 θ_2 는 자계가 slab으로 입사될 때의 입사각과 굴절각이며, μ_r 의 slab의 투자율이다. 그림 1에서 자기 경계조건을 이용하여 다음 식을 유도할 수 있다^[7].

$$d = s(1 - \mu_r), s = \frac{d}{1 - \mu_r}, \mu_r = 1 - \frac{d}{s} \quad (d > s) \quad (1)$$

식 (1)에서 확인할 수 있는 바와 같이 두 공진체 간의 거리(d), slab의 두께(s), slab의 투자율(μ_r) 중 두 가지 조건이 결정되면 나머지 값이 결정됨을 알 수 있다. 이상적 점 자하가 아닌 실제 루프 소스의 경우에는 식 (1)을 설계 초기치 정도로만 이해하고, 설계 파라미터 값들을 변화해 가며, 최대 효율을 위한 최적 값들을 찾아내야 한다.

그림 2(a)는 실제 루프 공진기를 사용했을 때의 무선 전력 전송 구조를 보여준다. 이 때, V 는 첫 번째 공진 루프의 교류 전압원, R_L 는 두 번째 공진 루프에서 전력 공급을 받기 위한 부하 저항이며, 각각의 루프는 공진을 위하여 컵 커패시터를 사용하였다. 루프(또는 코일) 형태의 공진체는 magnetic dipole로 볼 수 있으므로 실제 발생하는 자계가 점 자하일 때와는 차이가 있다. 하지만, 자계 결합 무선 전력 전송은 수 kHz 또는 수 MHz의 저주파에서 이

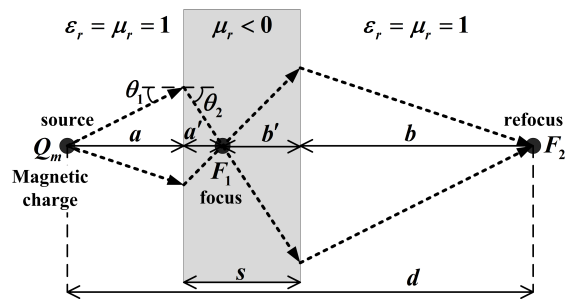


그림 1. 점 자하로부터 발생한 자계의 음의 투자율을 갖는 물질에 의한 집중 현상

Fig. 1. Focusing of magnetic field coming from point source by a slab with negative relative permeability.

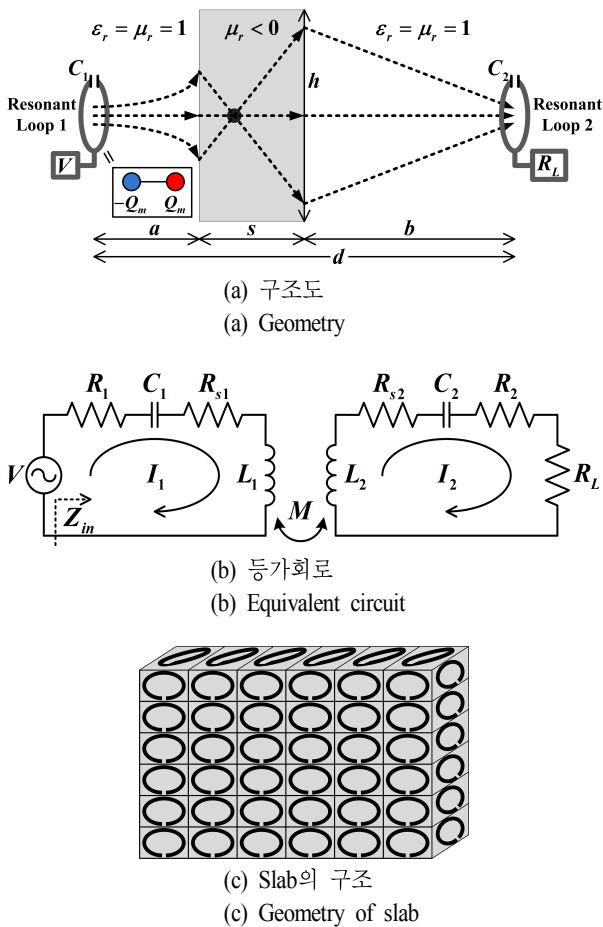


그림 2. 자계 집속을 위해 음의 투자율을 갖는 물질(slab)이 포함된 자계 결합 무선 전력 전송 구조와 제안된 등가회로 및 slab의 구조

Fig. 2. Magnetically coupled WPT system using slab with negative relative permeability for magnetic flux focusing, its equivalent circuit, and geometry of slab.

용되고, 공진체의 크기가 파장에 비해 매우 작으며, 보통 근접장에서 이루어지므로 식 (1)의 조건은 실제 slab을 포함하는 무선 전력 전송 시스템을 설계하는데 있어 근사적 초기값으로 사용할 수 있다.

그림 2(b)는 그림 2(a) 구조의 등가회로를 보여준다. 이 때, R_1 과 R_2 는 각각의 루프의 손실 저항과 방사 저항의 합이며, L_1 와 L_2 는 각각의 루프가 갖는 자기 인덕턴스이다. M 은 두 공진체 간의 상호 인덕턴스이며, $k\sqrt{(L_1 L_2)}$ 로 표현할 수 있고, 이 때 k 는 두 공진루프 간의 결합계수이다.

slab이 포함된 무선 전력 전송 시스템을 분석하기 위하여 일반적인 두 공진체간 자계 결합 무선 전력 전송 등가회로에 추가적으로 R_{s1} 과 R_{s2} 라는 slab의 손실을 나타낼 수 있는 저항을 각각의 폐회로에 삽입하였다. Slab는 SRR 타입의 공진기 배열로 구성되어 일반적으로는 저항으로만 모델링하기에는 무리가 있을 수 있으나 공진 주파수에서 만큼은 순수 저항으로 정확히 특성화 할 수 있음을 EM 시뮬레이션과 회로 시뮬레이션 결과를 통하여 확인하였다. R_{s1} 과 R_{s2} 의 값은 단일 루프만 존재한다고 가정하고 (또는 급전하지 않는 loop 공진기의 저항을 무한대로 놓고), slab와의 거리(a 또는 b)에 의해 결정되며, EM 시뮬레이션 또는 측정 결과로부터 각 공진 루프의 총 저항($R_1 + R_{s1}$ 또는 $R_2 + R_{s2}$)의 값을 확인하여 구할 수 있다. Ring resonator(또는 split ring resonator)의 3차원 다중 배열로 이루어진 일반적인 metamaterial slab의 구조를 그림 2(c)에 나타내었다.

KVL을 이용하여 두 공진 루프에 흐르는 전류 I_1, I_2 를 구하고, 이를 이용하여 입사전력 P_m 과 부하로 전달되는 전력 P_L 을 구하면 공진 주파수에서 전력전송 효율은 다음과 같다.

$$\eta_L = \frac{P_L}{P_{in}} = \frac{F_m^2}{(1 + b\sqrt{1 + F_m^2})\left(1 + \frac{1}{b}\sqrt{1 + F_m^2}\right)} \quad (2)$$

이 때, F_m 은 slab가 포함된 시스템의 유효 성능지수로써 다음과 같고,

$$F_m = k\sqrt{Q_1 Q_2} = k\sqrt{\frac{\omega_0 L_1}{R_1 + R_{s1}} \cdot \frac{\omega_0 L_2}{R_2 + R_{s2}}} \quad (3)$$

또, b 는 부하저항 R_L 과 최대효율을 만족하는 부하저항 $R_{L,opt}$ 의 비($R_L/R_{L,opt}$)이며, 이 때, $R_{L,opt}$ 는 다음과 같다^[8].

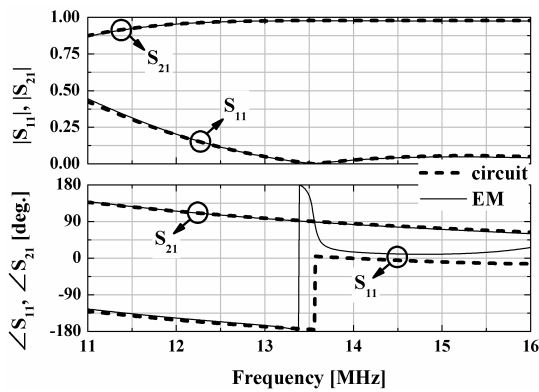
$$R_{L,opt} = (R_2 + R_{s2})\sqrt{1 + F_m^2} \quad (4)$$

식 (4)로 예측된 최대 효율을 위한 최적 부하는 많은 EM 시뮬레이션을 통해 매우 정확한 것으로 검증되었다.

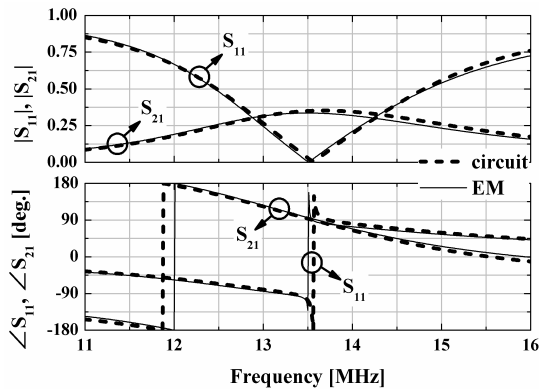
결합계수 k 는 EM-시뮬레이터로부터 식 (3)과 (4)를 이용하여 유추할 수 있으며, 또한 참고문헌 [8]을 이용하여 추출할 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과

그림 3은 제안된 등가회로 모델링을 검증하기 위하여 회로 시뮬레이션과 EM 시뮬레이션으로부터의 S-파라미터 결과를 비교한 것이다. 그림 3 (a)와 (b)는 각각 무손실 slab ($\mu_r = -1$)과 손실을 손실이 갖는 slab ($\mu_r = -1 - j2$)을 삽입하였을 때의 결과이다. 시뮬레이션 환경은 동일한 두 공진 루프를 사용하였으며, 루프의 반지름과 링의 반지름은 각각 5 cm, 0.2 cm이고, slab은 두 루프 중심에 위치하였으며, 이 때 순수한 루프의 Q-factor는 790이다. 두 공



(a) 무손실 slab ($\mu_r = -1$)
(a) Lossless slab ($\mu_r = -1$)



(b) 손실을 갖는 slab ($\mu_r = -1 - j2$)
(b) Lossy slab ($\mu_r = -1 - j2$)

그림 3. Slab의 손실에 따른 회로와 EM 시뮬레이션 결과 비교 ($r=5$ cm, $d=24$ cm, $s=12$ cm, $h=60$ cm, $a=b$)

Fig. 3. Comparison of circuit and EM simulation result according to slab losses ($r=5$ cm, $d=24$ cm, $s=12$ cm, $h=60$ cm, and $a=b$).

표 1. 매질에 따른 전송 효율

Table 1. Summary of WPT efficiencies.

		Slab의 투자율	효율 [%]	$R_{L,opt}$ [Ω]
EM	자유공간	1	32	0.1
	무손실 균일 매질	-1	97	17
	고손실 균일 매질	$-1 - j0.23$	18.9	7
	RR을 이용한 유효 매질	$-j - j0.23$ (at 13.56 MHz)	18.5	6.8
Meas.	RR을 이용한 유효 매질	$-j - j0.23$ (at 13.56 MHz)	22.2	6.8

($r=5.5$ cm, $d=24$ cm, $s=12$ cm, $h=36$ cm $a=b$)

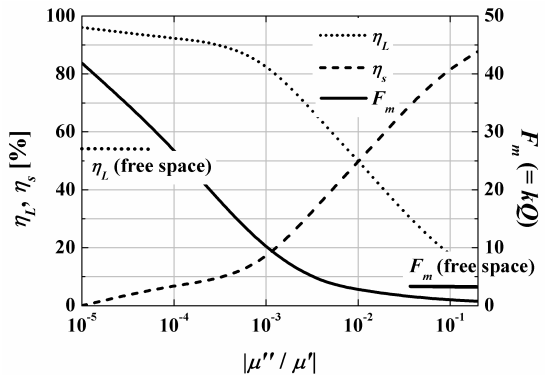


그림 4. Slab의 손실에 따른 전송 효율 (η_L), slab에서의 흡수률 (η_s), 손실을 고려한 시스템 성능지수 (F_m) ($r=5$ cm, $d=24$ cm, $s=12$ cm, $h=60$ cm, $a=b$)

Fig. 4. Transfer efficiency (η_L), absorption rate (η_s) in the slab, and figure of merit (F_m) considering slab losses as a function of slab loss tangent ($r=5$ cm, $d=24$ cm, $s=12$ cm, $h=60$ cm, and $a=b$).

진 루프 사이의 거리는 24 cm, slab의 두께와 높이는 각각 12 cm, 60 cm로 고정하였다. 무손실 slab의 경우, 등가회로 상의 R_{s1} , R_{s2} 의 값이 0.24 Ω 이고, 손실을 갖는 slab의 경우 R_{s1} 과 R_{s2} 의 값이 2.19 Ω 이다. 회로와 EM 시뮬레이션 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

표 1은 참고문헌 [4]의 결과를 정리한 것이다. 공진 주파수 13.56 MHz에서 반지름(r) 5.5 cm, 링의 반지름(r_{ring}) 0.1 cm인 두 공진 루프를 이용하였고, 이 공진 루프의

Q-factor는 473이다. 두 공진 루프간 거리(d)는 24 cm, slab의 유효 투자율(μ_r)은 -1 이다. 식 (1)에 의해 slab의 두께(s)는 12 cm로 설정하였으며, slab의 높이(h)는 37 cm이다. 표 1에서 균일 매질은 시뮬레이터에서 특정한 값을 갖는 매질(slab)을 설정한 것이고, 유효 매질은 실제 음의 투자율을 구현할 수 있는 ring resonator(RR)을 다중 배열하여 13.56 MHz에서 -1 의 투자율을 갖도록 설계한 것이다.

표 1에 나타난 바와 같이, 손실이 없는 slab이 무선 전력 전송 시스템에 삽입되면 slab이 삽입되지 않은 경우(자유공간)에 비해 전송효율이 32 %에서 97 %로 약 65 % 향상된다. 하지만 실제 RR 구조를 이용하여 유효 매질을 설계할 경우 손실이 있으며, 참고문헌 [4]의 경우 유효 투자율 -1 에서 자기 손실 탄젠트(magnetic loss tangent, $\tan \theta_m$)는 0.23으로 높은 손실을 나타낸다. 손실을 고려할 경우, 균일 매질과 유효 매질을 이용한 EM 시뮬레이션 결과와 유효 매질을 이용한 측정 결과에서 slab이 삽입되지 않은 경우에 비해 32 %에서 약 20 %로 전송효율이 12 % 감소한다. 이 경우는 slab 설계에 평면형 공진기를 사용하여 비교적 손실 탄젠트가 큰 영향도 있지만, 그림 1에서와 같이 점 자하를 가정하고 계산된 slab 두께(두 루프 공진페 사이 거리의 반)를 사용한 결과이다.

그림 4는 slab의 자기 손실 탄젠트의 변화에 따른 전송효율(η_L), slab에서의 흡수율(η_S), 흡수 효과를 고려한 시스템의 성능지수($F_m=kQ$)를 요소별로 보여준다. 이 때, 시뮬레이션 조건은 그림 3의 조건과 동일하며, slab의 유효 투자율의 실수부는 -1 , slab의 두께와 높이는 각각 12 cm, 60 cm로 고정하였고, slab의 유효 투자율의 허수부 즉, 자기 손실 탄젠트 값을 변화시키며, 결과를 관찰하였다. Slab이 삽입되지 않는 무선 전력 전송 시스템에서 전송효율은 약 53 %이며, slab의 자기 손실탄젠트가 아주 작을 때는 100 % 근접하는 효율을 얻을 수 있고, 약 0.008 이하일 때까지는 자유 공간에서의 효율보다 큼을 알 수 있다. 손실 탄젠트가 0.01이 될 경우는 루프 2로 수신되는 효율이 slab 흡수율과 같이 각각 50 %가 됨도 알 수 있다. Slab의 손실 탄젠트가 클수록 등가회로 상의 R_{S1} , R_{S2} 를 증가시키고, 시스템의 유효 성능지수(F_m)를 감소시켜 결국 전송효율 감소에 이어지는 메커니즘을 잘 볼 수 있다. 한 가지 유의 사항은 이러한 F_m 감소의 원인은 주로 유효

Q-factor 감소 때문이며, slab 손실에도 불구하고 추출된 자계 결합 계수는 그림 3에 제시된 손실탄젠트 범위 안에서 항상 자유 공간에서의 결합 계수보다 크게 나타났다는 것이다. Slab을 삽입하여 전송 효율을 증가시키기 위해서는 저손실 메타 매질이 필요하다. 하지만 유효 매질을 구현하기 위한 실제 구조(RR, SRR 등)에서 발생하는 손실은 시스템 설계에 있어 일정부분 감수하여야 한다. 따라서 slab의 손실을 감안하여 전송효율을 높이는 방안에 대하여 알아보았다. 점 자하가 아닌 실제의 루프 공진기를 사용한 경우는 slab 매질의 손실 탄젠트를 평가한 후, slab 두께를 줄여 가면서 최대 효율을 가지는 최적 두께를 결정해야 한다. 그림 5는 그림 3의 시뮬레이션 결과와 같은 조건에서 slab의 두께를 변화시키며 전송효율을 관찰한 것이다. Slab의 위치는 두께와 상관없이 항상 두 루프 사이의 가운데 위치하도록 하였다. 이와 더불어 중계 루프를 이용한 무선 전력 전송 시스템도 함께 비교하였다. 삽입된 균일 매질의 유효 투자율은 각각 $-1-j0.001$ (저손실 slab), $-1-j0.2$ (고손실 slab)이며 중계 코일은 수신 루프와 동일하되 별도의 부하 저항을 두지 않고 0로 설정하여 중계 성능을 최대화 하도록 하였다. 추가적인 구조의 삽입 없이 송·수신 루프만을 사용하였을 경우, 전송 효율은 앞서 밝힌 바와 같이 약 53 %이다. 두 루프 사이의 가운데 지점에 중계 코일을 삽입하였을 경우, 전송효율은 약 86 %로 중계 코일로 인해 약 33 %의 효율이 향상된다. 저손실 균일 매질을 삽입하였을 경우, s/d 가 0.6 이하일 때, slab을 삽입하지 않았을 때에 비해 전송효율이 더 높았고, s/d 가 0.35일 때 약 94 %로 최대 효율이 나타났다. 고손실 균일 매질을 삽입하였을 경우, s/d 가 0.25 이하일 때 slab을 삽입하지 않았을 때에 비해 더 높은 효율이 나타났고, s/d 가 0.15일 때 약 61 %로 최대 효율이 나타났다. 점 자하를 가정하고 slab의 투자율이 -1 인 경우, 식 (1)에 의하면 s/d 가 0.5일 때 가장 높은 효율이 가져야 한다. 하지만 사용된 송·수신 루프가 이상적 점 자하가 아니고 slab 두께가 손실에 상당한 영향을 주므로, 최대 효율을 가질 수 있는 slab의 두께는 더 얇게 최적화해야 전송 효율을 높일 수 있음을 확인할 수 있다. 이러한 영향은 고손실 slab일수록 크며, slab의 손실이 작을수록 이론적인 두께에 가까울 때 최대 효율이 나타남도 확인

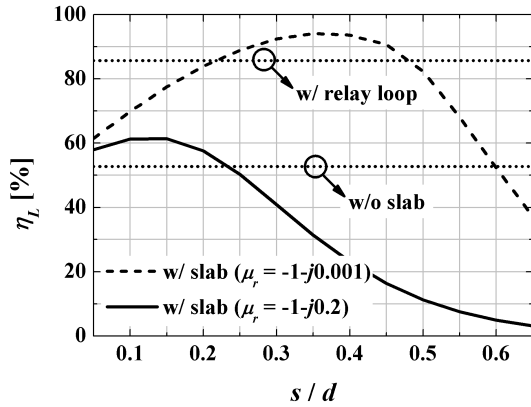


그림 5. 메타물질이 삽입되었을 경우, slab의 두께(s)에 따른 전송 효율(η_L) 변화($r=5$ cm, $d=24$ cm, $h=60$ cm, $a=b$).

Fig. 5. Transfer efficiency(η_L) as a function of width of slab(s)($r=5$ cm, $d=24$ cm, $h=60$ cm, and $a=b$).

할 수 있다. 메타 물질이 삽입된 경우와 중계 코일이 삽입된 시스템의 전송효율을 비교하였을 때, 저손실 메타물질은 중계 코일에 비해 최대 약 8 % 정도 효율을 높게 할 수 있고, 가정된 고손실($\mu_r = -1-j0.2$) slab인 경우 중계 코일에 비해 전송 효율이 23 % 정도 낮아짐을 볼 수 있다. 전력 효율이 중계 코일에 비해 제한적이기는 하나, 자계 결합 증가 효과는 상당히 크기 때문에 순수하게 자계 집중 효과가 필요한 MRI(Magnetic Resonance Imaging) 등에서는 상당한 개선 효과를 보고 있다^[9].

IV. 결 론

본 논문에서는 음의 유효투자율을 갖는 메타 물질을 포함하는 무선 전력 전송 시스템을 적절한 등가회로로 모델링하고 분석하였다. 메타 물질이 시스템에 삽입될 경우, 음의 투자율로 인한 자계 집중으로 인해 두 공진기 간 결합계수는 slab의 손실이 크더라도 증가한다. 하지만 이러한 slab의 손실을 반영한 공진기의 유효 Q-factor는 감소한다. 결국 증가한 결합계수와 감소한 유효 Q-factor의 곱으로 구해지는 성능지수가 slab 없이 구해지는 성능지수보다 클 경우에만 효율 향상에 기여함을 알 수 있었다. 저손실 slab인 경우, 성능지수와 효율이 크게 증가하나, 고손실인 경우 그 개선 정도가 상대적으로 작아진다. 일

단은 무선 전력 전송에 메타 slab은 사용하는 경우, 중계 루프를 사용하는 경우보다 구조의 복잡도와 크기 면에서 비교 우위에 있지 않다. 그러나 저손실 매질의 개발 여부가 관건이 될 것이다. 전력 효율이 중계 코일에 비해 제한적이기는 하나, 자계 결합 증가 효과는 고손실 매질에서도 상당히 크기 때문에 이에 대한 활용도 예상된다.

References

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljagic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonance", *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [2] X. Zhang, S. L. Ho, and W. N. Fu, "Quantitative design and analysis of relay resonators in wireless power transfer system", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 4026-4029, Nov. 2012.
- [3] B. Wang, K. H. Teo, T. Nishino, W. Yezazunis, J. Barnwell, and J. Zhang, "Experiments on wireless power transfer with metamaterials", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 25, pp. 254101(1-3), Jun. 2011.
- [4] T. Oh, B. Lee, "Analysis of wireless power transfer using metamaterial slabs made of ring resonators at 13.56 MHz", *JEES*, vol. 13, no. 4, pp. 259-262, Dec. 2013.
- [5] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, no. 18, pp. 3966-3969, Oct. 2000.
- [6] N. Garcia, M. Neito-Vesperinas, "Left-handed materials do not make a perfect lens", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 88, no. 20, pp. 207403(1-4), May 2002.
- [7] M. N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, Prentice-Hall, Oxford USA, 2000.
- [8] 김건영, 이범선, "자계 결합 무선 전력 전송에서의 결합 계수 추출 방법", *한국전자과학회논문지*, 23(9), pp. 1073-1078, 2012년 9월.
- [9] M. J. Freire, L. Jelinek, R. Marques, and M. Lapine, "On the applications of $\mu_r = -1$ metamaterial lenses for magnetic resonance imaging", *J. Magn. Reson.*, vol. 203, pp. 81-90, Dec. 2010.

김 건 영



2010년 2월: 경희대학교 전파통신공학과 (공학사)
2012년 2월: 경희대학교 전자·전파공학과 (공학석사)
2012년 3월~현재: 경희대학교 전자·전파공학과 박사과정
[주 관심분야] Small Antenna, Metamaterial, Microwave Passive Devices, Wireless Power Transmission 등

이 범 선



1982년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1991년 5월: 미국 네브래스카 주립대 전자공학과 (공학석사)
1995년 5월: 미국 네브래스카 주립대 전자공학과 (공학박사)
1995년 9월~현재: 경희대학교 전자·전파공학과 교수
2014년 1월~현재: 한국전자과학회 재무 상임이사
[주 관심분야] Microwave Antenna, Metamaterials, RF Identification(RFID) Tags, Microwave Passive Devices, Wireless Power Transmission 등

오 택 규



2011년 8월: 경희대학교 전파통신공학과 (공학사)
2014년 2월: 경희대학교 전자·전파공학과 (공학석사)
2014년 7월~현재: 한국기계전기전자시험연구원 통신기술평가센터 연구시험전문
[주 관심분야] Antenna, Metamaterials, Microwave Passive Devices, Wireless Power Transmission 등