

결합된 자기공명을 통한 무선에너지 전력 전송 시스템의 회로 해석

田尙勳[†], 金勇海^{*}, 李明來^{*}, 姜承烈^{*}

Circuit Model Based Analysis of a Wireless Energy Transfer System via Coupled Magnetic Resonances

Sang-Hoon Cheon, Yong-Hae Kim, Myung-Lae Lee, and Seung-Youl Kang

요 약

자기공명을 이용한 무선 전력 전송 시스템의 등가회로 모델이 제시되었고, 이를 통한 설계기법이 제안되었다. 두 개의 코일로 구성된 간단한 트랜스포머의 등가회로를 확장하는 방법으로 본 시스템의 노드 방정식을 세웠고, 이로 부터 효율을 높이기 위한 최적의 코일간 거리를 해석하였다. 손실이 있는 경우의 주파수 특성을 계산하기 위해, 상용 설계 시뮬레이터에 등가회로 모델을 심었다. 실제 시스템의 모델 파라미터를 추출하여 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교하였다. 이 해석으로부터, 자기공명 방식의 무선 전력 전송 시스템이 수 미터의 거리까지 높은 효율을 보일 수 있음을 알 수 있었고, 이때 임피던스 정합이 매우 중요하다는 것을 알 수 있었다. 개발된 모델을 통해 공진 코일이 더 많이 있는 경우와 같은, 유사한 시스템의 특성을 예측할 수 있다.

ABSTRACT

A Simple equivalent circuit model is developed for a wireless energy transfer system via coupled magnetic resonances and a practical design method is also provided. Node equations for the resonance system are built with the method, expanding on the equations for a transformer, and the optimum distances of coils in the system are derived analytically for optimum coupling coefficients for high transfer efficiency. In order to calculate the frequency characteristics for a lossy system, the equivalent model is established at an electric design automation tool. The model parameters of the actual system are extracted and the modeling results are compared with measurements. Through the developed model, it is seen that the system can transfer power over a mid-range of a few meters and impedance matching is important to achieve high efficiency. This developed model can be used for a design and prediction on the similar systems such as increasing the number of receiving coils and receiving modules, etc.

Key Words : Wireless, Energy transfer, Model

1. 서 론

[†]교신저자 : 정회원, 한국전자통신연구원 선임연구원

E-mail : sh.cheon@etri.re.kr

^{*}정회원, 한국전자통신연구원 책임연구원

접수일자 : 2010. 9. 17 1차 심사 : 2010. 11. 19

심사완료 : 2010. 12. 22

지난 수년간 무선 전력전송에 대한 관심과 연구가 폭발적으로 증가하여 왔다. 그 결과로, 자기유도방식의 경우 80%의 높은 효율을 보여주고 있는 전기자동차를 포함한^{[1][5]} 여러 전자기기에서 주목할 만한 연구결과를

보여주고 있다^{[1]-[5]}. 그러나, 대부분의 연구가 코일크기의 30% 보다 작은 매우 가까운 거리에 제한되어 있고, 수 미터 정도 떨어진 근거리에서의 결과는 보여 주지 못하고 있다.

최근 들어, MIT에서 강하게 결합된 자기공명현상을 이용한 새로운 방식의 무선전력전송 방식을 제안하였다^{[6][7]}. 이 방식은 자기유도 방식과 달리 수 미터의 근거리에서 전송이 가능할 것으로 기대되고 있고, MIT에서는 2m의 거리에서 40%효율을 시연해 보이기도 했다. 기존의 비접촉 무선 전력전송 기술과 비교해볼 때, 자기공명 기술은 몇 가지 근본적으로 다른 점을 가지고 있다. 공명현상은 방향성이 없어, 여러 방향으로의 에너지 전송이 가능하고, 송수신부 간의 결합이 매우 약하더라도 효율적으로 에너지 전송을 할 수 있다. 이러한 특성은 모두 공명현상의 자연적인 특성에 기인한 것이다.

자기공명은 무선전력전송 분야에는 새로운 방식으로, 아직까지 물리적인 해석만이 연구되어 있고 이러한 해석방법은 전기전자 엔지니어에게는 생소한 방법이다^{[6][7]}. 실제로 전자기기에 사용되기 위해서는 전자적이고 실용적인 해석방법과 도구들이 필요한데 이에 대한 연구는 거의 없거나 매우 부족한 상황이다^{[8][9]}. 또한 송신부 또는 수신부를 이루는 두 코일의 거리는 어느 정도 떨어 뜨릴 때 전송효율이 증가하는 것에 대한 이해, 기존의 자기유도 방식에 비해 먼 거리에서 높은 효율을 보이는 특성이 물리적 해석으로는 잘 나타나지 않는다.

본 논문에서는 자기공명을 통한 무선전력전송 시스

템의 간단한 등가회로를 세우고 이를 검증하였다. 4개의 코일로 이루어진 시스템의 노드 방정식을 무손실의 경우에 대해 해석하였고, 이로부터 앞서 언급한 특성들에 대해 이해 할 수 있었다. 또한 실제 전자기기의 응용을 위해 시뮬레이션 프로그램에 모델을 심고, 모델 파라미터를 측정을 통해 추출하여 시스템 특성과 비교해 보았다.

2. 무손실 경우의 노드 방정식

4개의 코일로 구성된 자기공명방식의 무선전력전송 시스템은 2개의 코일로 이루어진 트랜스포머의 확장된 형태로 해석할 수 있다. 전력, 송신, 수신, 부하의 4개 코일로 구성된 전체 시스템이 그림1에 나타나 있다. 이 시스템은 각각의 코일이 서로 커플링이 되어 있는 형태로 해석할 수 있고, 커플링이 매우 작은 상호인덕턴스를 무시하고 무손실의 경우로 가정하면, 그림2의 등가회로에서 다음과 같은 노드 방정식을 세울 수 있다.

$$i_s = \frac{V_s}{Z_0} + j\omega C_P V_s + i_1, \quad V_s = j\omega L_P i_1 + j\omega M_{PS} i_2 \quad (1)$$

$$0 = j\omega L_S i_2 + j\omega M_{PS} i_1 + j\omega M_{SR} i_3 + \frac{i_2}{j\omega C_S} \quad (2)$$

$$0 = j\omega L_R i_3 + j\omega M_{SR} i_2 + j\omega M_{RD} i_4 + \frac{i_3}{j\omega C_R} \quad (3)$$

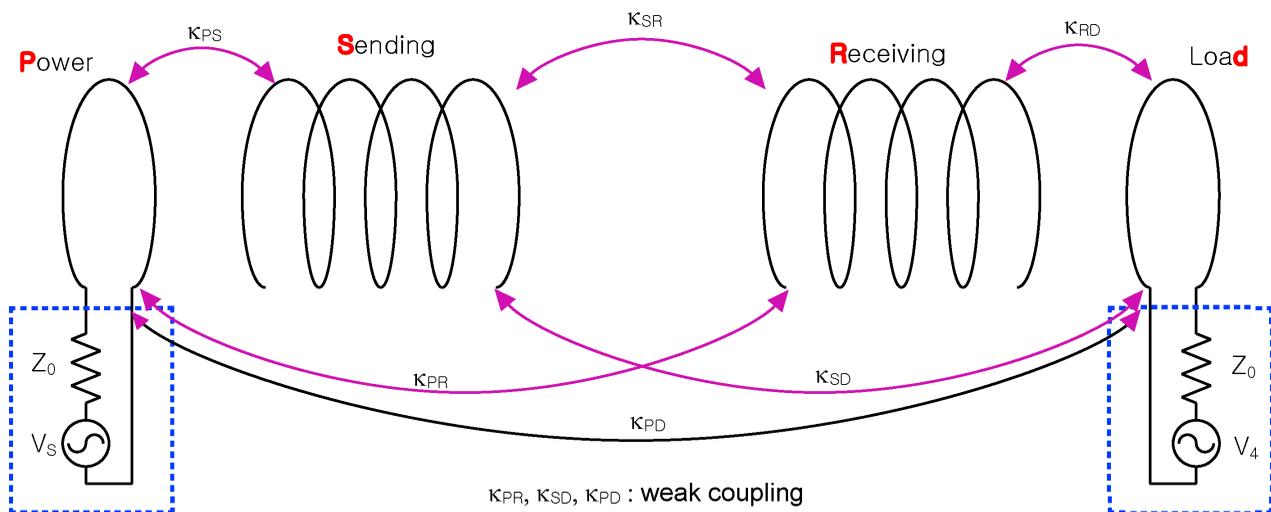


그림 1 결합된 자기공명을 이용한 무선 전력 전송 시스템
 Fig. 1 Schematic of wireless energy transfer system using coupled magnetic resonances

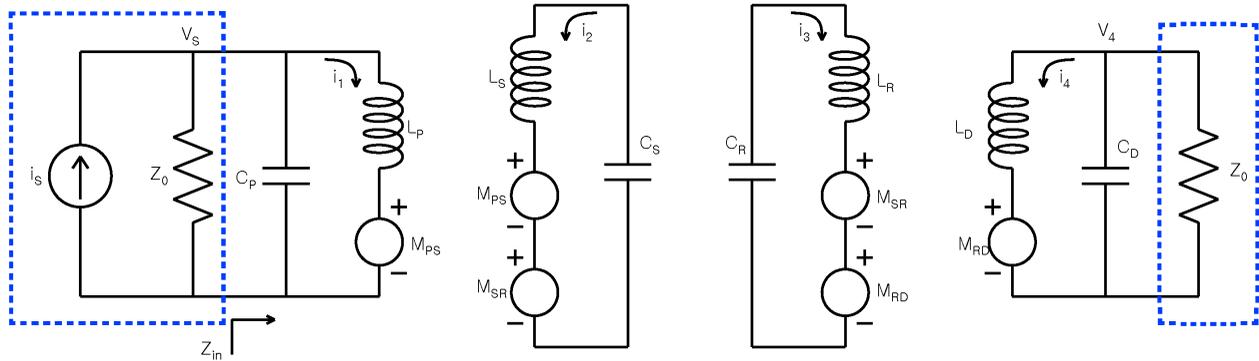


그림 2 보상 전원이 포함된 그림 1의 등가 회로
Fig. 2 Circuit of fig.1 with compensation sources

$$0 = \frac{V_4}{Z_0} + j\omega C_D V_4 + i_4, \quad V_4 = j\omega L_D i_4 + j\omega M_{RD} i_3 \quad (4)$$

해석의 편이를 위해 무손실 경우로 가정하였다. 입력쪽에서 두 코일간의 상호 인덕턴스의 효과는 보상전원의 형태로 변환할 수 있고, 그림 3의 (a),(b),(c)에 나타나 있듯이 이를 순차적으로 계산할 수 있다. 그림 3(a)에서 부하코일에 의해 수신 코일에 유도되는 상호 인덕턴스의 효과 Z_{RM} 은,

$$Z_{RM} = \frac{\omega^2 \kappa_{RD}^2 L_R L_D}{\frac{1}{1/Z_0 + j\omega C_D} + j\omega L_D} = \frac{\omega^2 \kappa_{RD}^2 L_R L_D}{Z_D} \quad (5)$$

순차적으로 그림3(b)에서 수신코일에 의해, 송신코일에 유도되는 상호 인덕턴스의 효과 Z_{SM} 은,

$$Z_{SM} = \frac{\omega^2 \kappa_{SR}^2 L_S L_R}{Z_{RM} + \frac{1}{j\omega C_R} + j\omega L_R} = \frac{\omega^2 \kappa_{SR}^2 L_S L_R}{Z_R} \quad (6)$$

마지막으로 그림3(c)에서 송신코일에 의해, 전원코일에 유도되는 상호 인덕턴스의 효과 Z_{PM} 은,

$$Z_{PM} = \frac{\omega^2 \kappa_{PS}^2 L_P L_S}{Z_{SM} + \frac{1}{j\omega C_S} + j\omega L_S} = \frac{\omega^2 \kappa_{PS}^2 L_P L_S}{Z_S} \quad (7)$$

식 (5)~(7)로부터,

$$Z_{PM} = \frac{\omega^2 \kappa_{PS}^2 L_P L_S}{\frac{\omega^2 \kappa_{SR}^2 L_S L_R}{\frac{\omega^2 \kappa_{RD}^2 L_R L_D}{\frac{1}{1/Z_0 + j\omega C_D} + j\omega L_D} + j\omega C_R} + \frac{1}{j\omega C_S} + j\omega L_S} \quad (8)$$

전송코일과 수신코일의 공진 주파수가 같다면,

$$\omega_0^2 L_S C_S = \omega_0^2 L_R C_R = 1 \quad (9)$$

$$\frac{1}{j\omega C_S} + j\omega L_S = \frac{1}{j\omega C_R} + j\omega L_R = 0 \quad (10)$$

이고, 공진주파수에서 Z_{PM} 은

$$Z_{PM} = \frac{\omega_0^2 \left(\frac{\kappa_{PS} \kappa_{RD}}{\kappa_{SR}} \right)^2 L_P L_D}{\frac{1}{1/Z_0 + j\omega_0 C_D} + j\omega_0 L_D} \quad (11)$$

로 간략화 된다. 식(11)은 코일 두 개로 이루어진 트랜스포머의 식과 같은 형태로 커플링계수가 $\kappa_{PS}\kappa_{RD}/\kappa_{SR}$ 로 바뀐 것만 다르다. 결국 전체 시스템은 공진주파수에서 그림4와 같은 등가회로로 바뀔 수 있다. L_P 가 L_D 와 같고, 전력코일의 공진주파수가 전송코일의 공진주파수와 같다면 다음의 관계가 성립한다.

$$\omega_0^2 L_P C_P = \omega_0^2 L_D C_D = \omega_0^2 L_P C_D = 1 \quad (12)$$

또한 $\kappa_{PS}\kappa_{RD}/\kappa_{SR}=1$ 이라면 Z_{PM} 은,

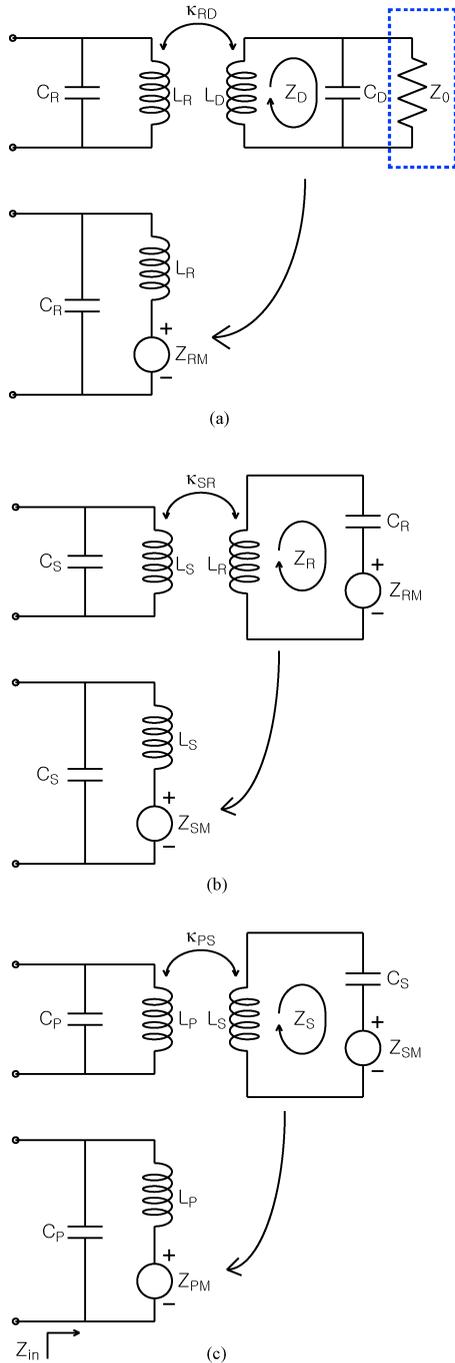


그림 3 (a)부하코일에 의해 유도된 상호 인덕턴스를 보상 전원으로 등가화 한 회로 (b)수신코일과 부하코일에 의해 유도된 (c)송신코일, 수신코일, 부하코일에 의해 유도된

Fig. 3 Circuit with compensation sources for mutual inductance induced by (a)load coil, (b) receiving and load coils, and (c) sending, receiving and coils

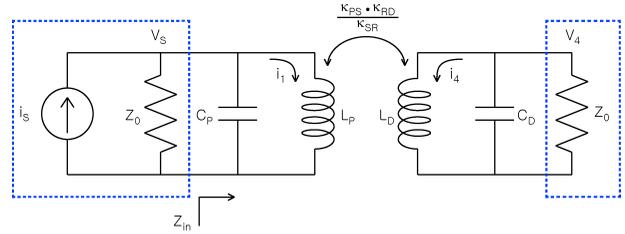


그림 4 공진주파수에서 간략화된 회로도
Fig. 4 Simplified circuit schematic at a resonance frequency

$$Z_{PM} = \frac{\omega_0^2 \left(\frac{\kappa_{PS} \kappa_{RD}}{\kappa_{SR}} \right)^2 L_P L_D}{\frac{1}{1/Z_0 + j\omega_0 C_D} + j\omega_0 L_D} = -j\omega_0 L_P + Z_0 \quad (13)$$

마지막으로 전력발생기에서 보는입력 임피던스 Z_{in} 은

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega_0 C_P} \parallel (j\omega_0 L_P + Z_{PM}) = \frac{1}{j\omega_0 C_P} \parallel Z_0 \quad (14)$$

C_P 은 매우 작은 값으로 무시할 만하므로, Z_{in} 은 부하 저항인 Z_0 와 완벽히 정합을 이루게 된다. 즉 이론적으로 커플링 효율은 100%가 되는 것이다. 송신부와 수신부의 거리가 멀어서 κ_{SR} 이 작게 되더라도 송신부를 이루는 두 코일 그리고 수신부를 이루는 두 코일의 간격을 조절함으로써 $\kappa_{PS}\kappa_{RD}/\kappa_{SR}$ 을 1로 만들 수 있다. 그 결과로 매우 높은 결합 효율을 얻을 수 있게 되는 것이다.

3. 모델링을 위한 측정과 파라미터 추출

노드 방정식을 푸는 과정에서는 손실이 없는 경우를 가정하였고, 또한 커플링이 작은 상호 인덕턴스를 무시하였으나, 정확한 모델링을 위해 이 모두를 고려해야만 한다. 손실과 약한 커플링을 고려할 경우 노드 방정식을 푸는 것은 쉽지가 않고, 주파수에 따른 특성 또한 확인이 필요하기 때문에 시뮬레이션 프로그램을 사용해야만 한다. 따라서, 등가회로를 구성하여 시뮬레이터에 이를 구현, 모델을 심는 과정이 필요하다. 네 개의 코일에 대해서는 모두 여섯 개의 커플링 계수가 존재하고, 이를 포함하여 총 22개의 파라미터를 가진 등가회로 모델을 ADS의 SDD를 이용하여 구현할 수 있다.

코일은 간단한 인덕터와 캐패시터로 모델링 되고,

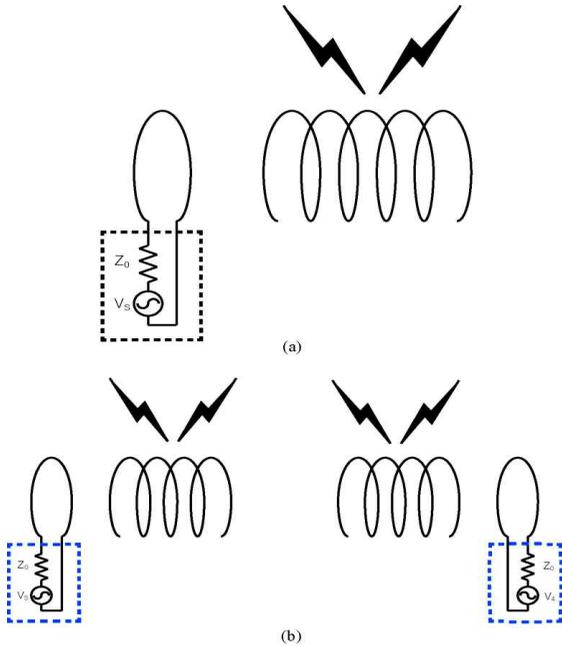


그림 5 손실측정을 위한 구성도 (a) 1-port 측정의 경우 (b) 2-port 측정의 경우
 Fig. 5 Configuration for loss measurement by (a) 1-port measurement of floating coil, and (b) 2-port measurement of energy transfer system

S-parameter 측정을 통해 그 값을 추출할 수 있다. 두 코일은 간단한 트랜스포머로 생각할 수 있고, 두 코일 간의 S(2,1)으로 부터 커플링 계수를 추출할 수 있다. 손실에는 skin effect에 의한 ohmic 손실과, 방사에 의한 손실 두 가지가 존재하는데, 모두 저항으로 모델링할 수 있고, 그림5의 구성을 통해 측정을 한 후 식(15)와 (16)을 통해 그 값을 추출할 수 있다.

$$Loss = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \text{ for 2-port measurement (15)}$$

$$Loss = 1 - |S_{11}|^2 \text{ for 1-port measurement (16)}$$

실험을 위해 제작된 전송시스템의 사진이 그림6이다. 사용된 전선의 두께는 3mm이고 코일의 지름은 모두 15cm 이다. 전송 코일과 수신 코일은 4mm의 간격으로 8회, 전력 코일과 부하 코일은 1회의 감은수를 가지고 있다.

각 코일을 각각 S-parameter 측정을 하고, 두 코일 간의 S-parameter 측정도 하여, 파라미터 추출을 한 결과가 표1과 표2에 나타나 있다. 손실저항의 경우 그림5(a)의 구성에 대해 측정을 하고 식(16)을 통해 그

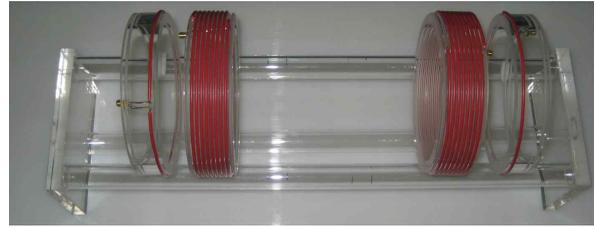


그림 6 무선전력 전송 실험을 위해 제작된 소자 사진
 Fig. 6 Device photograph of energy transfer experiment

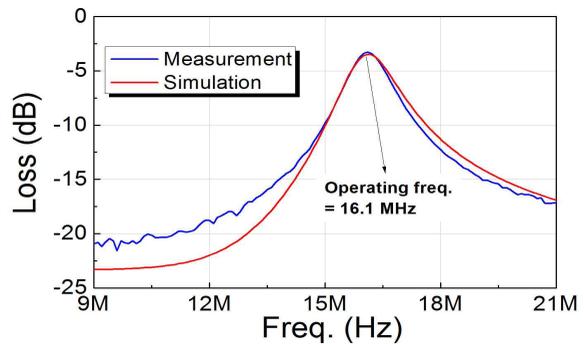


그림 7 그림5(b)의 구성을 사용하고, 식16을 사용하여 손실을 추출해 낸 그래프
 Fig. 7 Configuration on Fig. 5(b) was used for loss extraction. Calculated loss by using (16)

표 1 추출된 코일 파라미터들과 최적화후의 값들
 Table 1 Extracted coil parameters and values after optimization

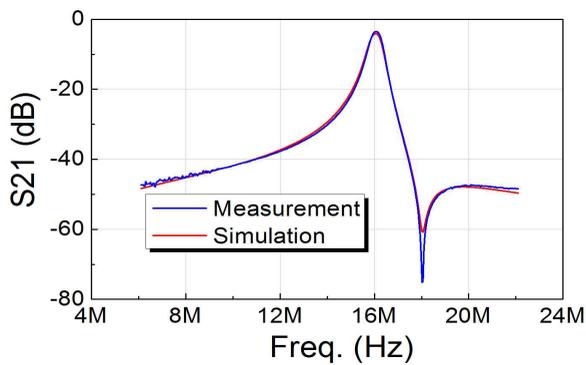
Coil	Parameter	Raw	opt.	ETC
Power	Lp	0.475	0.475	uH (Inductance)
	Cp	3.70	3.70	pF (Capacitance)
	Rp	1.0E-09	1.0E-09	Ohm (Resistance)
	fp	120	120	MHz (Res. frequency)
Load	Ld	0.475	0.475	
	Cd	3.70	3.70	
	Rd	1.0E-09	1.0E-09	
	fd	120	120	
Sending	Ls	14.9	14.9	
	Cs	7.98	6.99	
	Rs	15.3	15.3	
	fs	14.6	15.6	
Receiving	Lr	14.9	14.9	
	Cr	7.98	6.99	
	Rr	15.3	15.3	
	fr	14.6	15.6	

값을 추출하였다. 그 결과가 그림7에 나타나 있다.

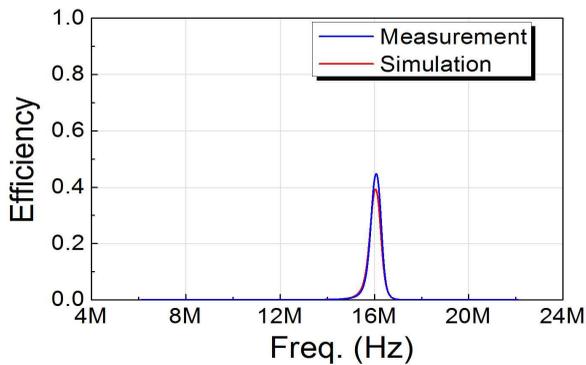
표에 나타나 있는 3cm, 15cm, 23cm 는 송신부와 수신부가 떨어진 거리이다. 그림8은 15cm 떨어진 시스템의 전송특성에 대해 측정한 결과와 모델링의 결과를 비교한 것이다.

표 2 추출된 결합계수들과 최적화후의 값들
Table 2 Extracted coupling coefficient and values after optimization

	Distance					
	3.0 cm		15.0 cm		23.0 cm	
	Raw	Opt.	Raw	Opt.	Raw	Opt.
Kps	0.370	0.343	0.229	0.217	0.162	0.176
Ksr	0.220	0.157	0.031	0.023	0.012	0.008
Krd	0.370	0.343	0.229	0.217	0.162	0.176
Kpr	0.090	0.090	0.013	0.014	0.005	0.005
Kpd	0.041	0.038	0.006	0.005	0.002	0.002
Ksd	0.090	0.090	0.013	0.014	0.005	0.005



(a)



(b)

그림 8 전송거리가 15cm인 시스템에 대해 측정된 특성과 시뮬레이션 결과의 비교 (a) S21. 전송된 전력 (b) 전송 효율

Fig. 8 Measured and simulated results for the system having distance of 15.0cm between sending and receiving coils. (a) S21. Transferred power (b) Transfer efficiency

4. 다중 코일 전송 시스템

앞의 해석 방법과 모델링 방법을 발전시키면, 보다 많은 코일의 경우도 예측할 수 있다. 전원 코일과, 부

하 코일 사이에 4개의 공진 코일이 있는, 코일이 6개인 시스템에 대해 앞의 해석을 적용해 보면, 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

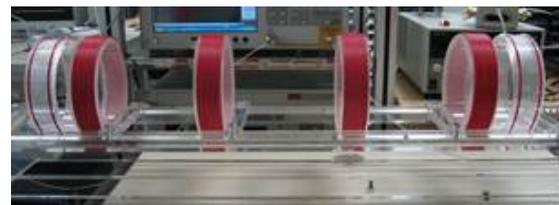
$$Z_{PM} = \frac{\omega_0^2 \left(\frac{\kappa_{P1}\kappa_{23}\kappa_{4D}}{\kappa_{12}\kappa_{34}} \right)^2 L_P L_D}{1/Z_0 + j\omega_0 C_D} \quad (17)$$

앞에서와 똑같은 해석을 통해, 공진 코일간의 커플링 계수를 적절히 조절하면 높은 전송 효율을 얻을 수 있음을 위 식을 통해 알 수 있다. 즉 공진 코일을 통해 전력을 증계하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다. 모델링의 경우 앞에서와 같은 방법을 확장해서 ADS에 구현할 수 있다.

이를 실험적으로 확인 하기 위해 그림9와 같은 시스템에 대해 측정을 해 보았다. 본 실험에서는 3mm의 간격으로 11회 감은 코일이 사용되었다. 그림9(a)는 전송거리가 50cm 인 시스템으로 전송 효율이 0.65% 의 낮은 값을 나타내고 있다. 여기에 그림9(b)와 같이 증계역할을 하는 코일 두 개를 적절히 배치시킴으로써 전송 효율을 높일 수 있다. 그 결과가 그림10에 나타나 있다. 두 개의 증계 코일을 배치한 후 전송 효율이 32%까지 향상된 것을 확인할 수 있다. 그림11은 2개의 증계코일이 들어간 전체 시스템을 모델링한 결과를 나타내고 있다.



(a)



(b)

그림 9 전력 증계 실험을 위해 제작된 소자의 사진
Fig. 9 Device photograph of relay energy transfer experiment

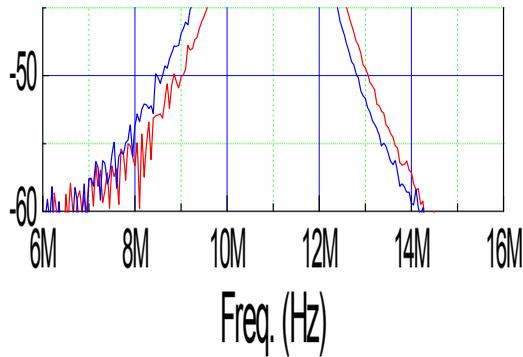


그림 10 전력 중계 실험의 S21 결과
Fig. 10 S21 of relay energy transfer experiment

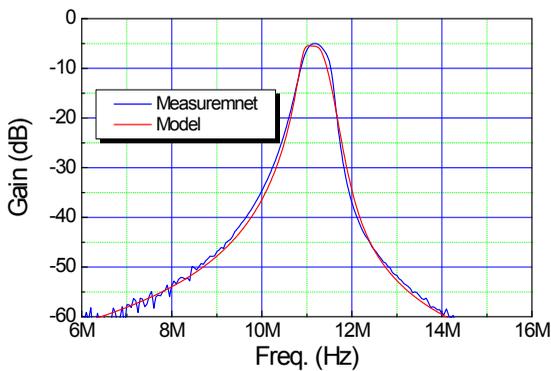


그림 11 전력 중계 시스템의 측정된 값과 시뮬레이션 결과의 비교
Fig. 11 Measured and simulated results for the relay energy transfer system

5. 결 론

본 논문에서는 자기공명방식을 통한 무선전력전송 시스템의 등가회로를 세우고, 이를 범용 RF 시뮬레이터인 ADS에 구현하였다. 모델 파라미터를 추출하여 이를 시스템 전송시스템과 비교해 모델의 유용성을 확인하였다. 본 논문을 통해 확립된 등가 모델을 통해 자기공명방식의 무선 전력전송 특성에 대한 이해를 높일 수 있었고, 나아가 시스템의 설계에도 사용할 수 있었다.

본 연구는 지식경제부, 방송통신위원회 및 한국산업기술 평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [10035181, 100W 이하 RF 에너지 전송 및 재생기술 개발]

참 고 문 헌

- [1] Z. N. Low, R. A. Chinga, R. Tseng, and J. Lin, "Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power transfer system", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 56, No. 6, pp. 1801-1812, 2009, May.
- [2] A. Esser and H. -C. Skudelny, "A new approach to power supplies for robots", *IEEE Trans. Industry Appl.*, Vol. 27, No. 5, pp. 872-875, 1991, Sept.
- [3] J. J. Casanova, Z. N. Low, and J. Lin, "A loosely coupled planar wireless power system for multiple receiver", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 56, No. 8, pp. 3060-3068, 2009, August.
- [4] J. Hirai, T.-W. Kim, and A. Kawamura, "Wireless transmission of power and information for cableless linear motor drive", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 15, No. 1, 2000, Jan.
- [5] J. Sallan, J. L. Villa, A. Lombart, and J. F. Sanz, "Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 56, No. 6, pp. 3060-3068, 2009, June.
- [6] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science*, Vol. 317, pp. 83-86, 2007, July.
- [7] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", *Annal of Physics*, Vol. 323, pp. 34-48, 2007.
- [8] C. Zhu, K. Liu, C. Yu, R. Ma, and H. Cheng, "Simulation and experimental analysis on wireless energy transfer based on magnetic resonances", *Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1-4, Harbin China, 2008, September 3-5.
- [9] W. Fu, B. Zhang, D. Qiu, and W. Wang, "Analysis of transmission mechanism and efficiency of resonance coupling wireless energy transfer system", *International Conference Electrical machines and systems*, pp. 2163-2168, Wuhan China, 2008, October 17-20.

저 자 소 개



전상훈(田尙勳)

1971년 12월 12일생. 1993년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공학박). 2001년~2006년 (주)나리지은 InGaP HBT 파운드리 사업본부 Device Engineering 팀장. 2006년~현재 한국전자통신연구원 선임연구원.



김용해(金勇海)

1969년 11월 3일생. 1991년 KAIST 물리학과 졸업. 1993년 동 대학원 물리학과 졸업. 1997년 동 대학원 물리학과 졸업(공박). 1997년~2001년 Hynix semiconductor 과장. 2001년~현재 한국전자통신연구원 책임연구원.



이명래(李明來)

1966년 10월 27일생. 1989년 동아대 자연대 물리학과 졸업. 1992년 KAIST 대학원 물리학과 졸업(석사). 1998년 KAIST 대학원 물리학과 졸업(공박). 1998년~1999년 ETRI Post Doc. 1999년~현재 한국전자통신연구원 책임연구원.



강승열(姜承烈)

1965년 1월 24일생. 1987년 서울대 자연과학대학 물리학과 졸업. 1990년 한국과학기술원(KAIST) 물리학과(석사). 1994년 동대학원 물리학과 졸업(공박). 1994년~현재 한국전자통신연구원 책임연구원.