

무선전력전송기술의 기술적 이론적 상호 관계

Technological and Theoretical Relationship between Wireless Power Transfer Technologies

이 동 수* · 임 동 남* · 전 성 줍[†]
(Dong-Su Lee · Dong-Nam Lim · Seong-Jeub Jeon)

Abstract - Wireless power transfer (WPT) system is very attractive because it removes power cables from home appliances, office equipments and battery chargers for electric vehicles. In this paper, non-radiative WPT systems studied recently are claimed to be technologically or theoretically identical in operation irrespective of the number of coils. Especially, 2-coil and 3-coil systems are compared in detail. It is also shown that multiplicity of coils does not increase power transfer capability.

Key Words : WPT, Wireless power transfer, Resonance, Induction, Inductive power transfer

1. 서 론

최근 들어 전기기기의 편리성과 안전성을 위하여 무선전력전송시스템이 많이 연구되어 도입되고 있다. 무선전력전송 시스템은 급전 측에서 집전 측으로 직접 전선을 연결하지 않아도 되는 장점이 있다. 직접 전선으로 연결되지 않으면 사용자가 전격 등에 노출되지 않아 안전성이 증가하고 전선으로부터 자유로워져 가동성 또는 편리성이 증대한다. 이런 장점으로 인해 가전 기기, 사무용 기기나 전기 자동차 등에 무선으로 전기를 공급하는 시스템이 크게 주목을 받고 있다[1]-[5]. 특히 MIT 시스템이 발표된[2],[4] 이후 비교적 원거리에서 있는 곳에 무선으로 전력을 전달하고자 하는 많은 연구가 이루어져 이전에는 고려해 보지 못했던 거리에 있는 장치에 전력을 전송할 수 있게 되었다. 그런데 이 방식은 자기공진형이라 불리며 그전의 것들과 전혀 다른 것으로 인식되기도 한다. 본 논문에서는 이 방식이 그 전에 사용되던 것[5]과 크게 다르지 않음을 보이고자 한다. 그러면 설계는 많이 연구된 이전 방식으로 이루어질 수 있다.

2. 본 론

무선 전력 전송에는 1) 용량성 결합에 의한 것, 2) 유도성 결합에 의한 것과 3) 마이크로파 방사에 의한 것이 있는데 본 고에서는 유도성 결합에 의한 전력전송만을 한정하여 논하려고 한다.

2.1 유도성 무선 전력 전송

유도성 전력 전송이라는 용어는 많이 쓰고 있으나 그 정의가 명확히 내려진 것 같지 않다. 유도성 전력 전송이 이루어지기 위해서는 먼저 2개 또는 그 이상의 코일(inductor)이 있어야 하고 여기에 두 번의 (상호) 유도작용이 있어야 한다. 그림 1은 두 코일에 두 번의 유도 작용이 있는 것을 나타내었다. 상호유도작용이란 한 코일에 흐르는 전류에 의해 다른 쪽 코일에 유기기전력이 발생하는 것이다. L_1 , L_2 는 각기 1차와 2차의 자기 인덕턴스, M 은 상호 인덕턴스다. 두 코일에서 두 번의 유도작용이 일어난 것은 식 (1), (2)와 같이 표현된다. 만일 (3)과 같이 유기된 전압과 전류의 곱의 시간적 평균이 영이 아니면 전력 전송이 일어난다. 이렇게 전력전송이 일어나는 것을 유도성 전력전송이라고 할 수 있다. 입력전력 P_1 은 출력전력 P_2 와 같고 P_2 가 영이면 P_1 도 영이 된다. 방사형인 경우는 출력전력이 영이어도 입력전력은 영이 되지 않는다. 유도성은 비방사성이고 비방사성이라면 유도성이다. 그리고 유도성 전력전송시스템은 선형시스템이고 가역적이다. 즉, 1, 2차는 그 기능을 서로 바꿀 수 있다. 유도성 무선전력전송 시스템은 coil의 갯수와 자기 인덕턴스를 보상하는 정도에 따라 여러 가지로 분류될 수 있다. 최근 들어 많은 주목을 받고 있는 MIT에서 제안한 방식도 높은 주파수를 사용하기 때문에 부유용량을 포함한 분포정수회로를 사용하여 외관상 달라보여도 이들 중 하나로 볼 수 있다.

$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

$$v_2 = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

$$P_1 = ave(v_1 i_1), \quad P_2 = ave(v_2 i_2) \quad (3)$$

* Dept. of Electronic Engineering, Pukyong Nat'l Univ., Korea

[†] Corresponding Author : Dept. of Electronic Engineering, Pukyong Nat'l Univ., Korea

E-mail : jeub@pknu.ac.kr

Received : September 3, 2013; Accepted : January 21, 2014

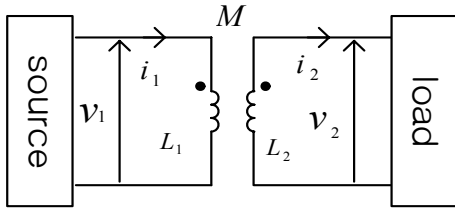


그림 1 무선전력전송 시스템
Fig. 1 Wireless power transfer system

2.2 보상하는 방법과 종류

식 (1)과 (2)에서 전력전송에 기여하는 항은 상호인덕턴스 (M)와 관련된 항이고 자기 인덕턴스 (L_1, L_2)와 관련된 항은 전류의 흐름을 방해하는 것으로 커패시터에 의해 보상할 수 있다. 커패시터로 보상하면 공진 회로가 구성된다. 보상하는 방법과 그에 따른 시스템의 종류는 공진회로가 구성되는 방법으로 설명될 수 있다.

2.2.1 무공진형(무보상형):

1, 2차가 밀결합된 경우에는 자기 인덕턴스 항을 보상하지 않아도 전력전달이 원활하게 이루어질 수 있다. 그래서 보상없이 시스템을 구성하기도 한다.

2.2.2 1차 공진형:

1, 2차를 통틀어서 하나의 공진회로를 구성하는 방법으로 1, 2차가 밀결합되어 있는 경우에 전력변환기의 스위칭 손실을 줄이기 위하여 사용하기도 하고 유도가열기나 무전극 전 구에서와 같이 2차 측을 접근할 수 없을 때에도 사용하는 방법이다[6],[7].

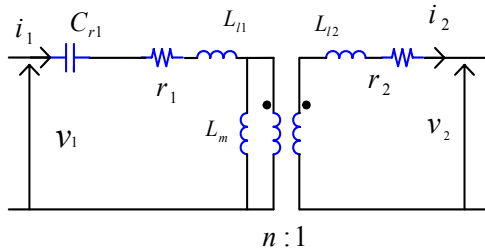


그림 2 1차 공진형 무선전력전송 시스템
Fig. 2 Single resonance WPT system

2.2.3 양측 공진형:

1, 2차에 각기 독립된 공진회로를 구성하는 방법으로 가장 효과적인 시스템으로 볼 수 있다.

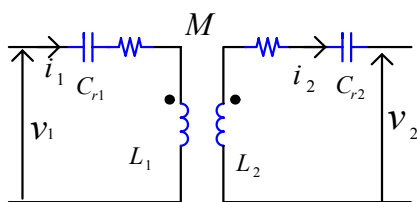


그림 3 양측 공진형 무선전력전송 시스템
Fig. 3 Double resonance WPT system

2.2.4 다 공진형:

코일이 셋 이상이고 공진회로가 셋 이상으로 구성된 시스템을 다(多) 공진형이라 부를 수 있고 여러 시스템들이 이 부류에 속한다. 그림 4(a)는 Auckland 대학에서 제안되었던 것으로 L_{13} 을 중심으로 구성된 회로는 1차 권선에 가깝게 설치되어 있고 중계기(intermediator)라 부르고[5] MIT 시스템 [2],[4]의 전원 측 공진기와 유사한 기능을 갖는다. 그림 4(b)는 KAIST에서 제안한 회로로 L_{23} 을 중심으로 구성된 회로는 2차 권선에 가깝게 설치되어 있고 보상권선(compensating winding) 또는 보조권선(auxiliary winding)이라 부른다[8]. 보조권선은 자동 튜닝을 목적으로 설치하였다. 그림 4(c)는 좌우편차를 줄이기 위하여 제안하였고 L_2, L_3 는 대등한 출력을 낸다. 그림 4(d)는 pickup의 출력을 줄이지 않으면서 장치 인근에 나타나는 인체에 나쁜 영향을 줄 수 있는 악성 EMF를 줄이기 위하여 제안되었다. 그림 4(e)는 최근 가장 주목받고 있는 시스템으로 MIT에서 제안한 것의 송신 코일과 수신코일에 공진 커패시터를 추가한 것이다[2],[4],[9].

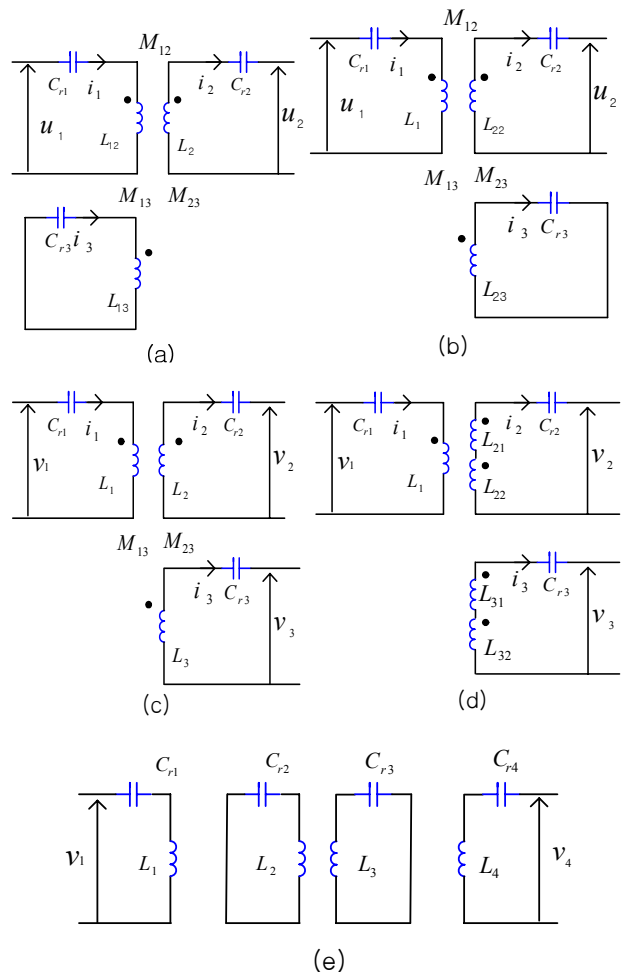


그림 4 다 공진형 무선전력전송 시스템
Fig. 4 Multi-resonance WPT system

2.3 다공진형(3-coil 형)과 양측 공진형(2-coil 형)의 관계

그림 4의 제안자들은 [2], [4]의 방식에서 분포정수 회로를 사용하고 있다. 그런데 [9]과 [10]에 따르면 집중 정수 회로를 구성하여도 유사한 특성이 얻어짐을 보였다. 즉, 집중정수를 사용하느냐 분포정수를 사용하느냐는 사용 주파수에 따른 것일 뿐 동작 원리와는 크게 상관이 없다. [2], [4]에서는 비교적 높은 주파수를 사용하므로 분포정수 회로를 사용할 수밖에 없다. 또한 [5]와 [8]에 따르면 중계권선 (intermediate winding)이나 보조권선(auxiliary winding)은 근본적인 동작 원리를 바꾸는 것이 아니라 특수한 목적의 기능을 수행하기 위하여 사용됨을 알 수 있다. 이 권선들은 [2]의 공진기와 동일한 것이다. [11]에 따르면 [2]의 방식에 임피던스 매칭 회로가 부가되면 전송효율은 더욱 높아진다. 효율이 더 높아질 수 있다는 것은 최적의 설계가 아니라는 것을 뜻한다. 그런데 임피던스 매칭이 필요하다면 직렬 공진이 가장 적합하다. 이런 일련의 과정은 그림 3과 같이 2-coil 형에 직렬 공진을 이용하는 것이 가장 적절한 방식을 알 수 있다. 본 논문에서는 중계 권선이나 보조권선이 출력을 증강시키지 못한다는 것과 직렬공진이 흔히 이야기 하는 병렬 공진보다 나은 것임을 보이려고 한다.

그림 3의 양측 공진형 WPT 시스템에서 정현파 동작을 가정하고 전압 전류 관계를 페이저로 표현하면 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{V}_1 = j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_{r1}}\right)\mathbf{I}_1 + j\omega M\mathbf{I}_2 \quad (4)$$

$$\mathbf{V}_2 = j\omega M\mathbf{I}_1 - j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_{r2}}\right)\mathbf{I}_2 \quad (5)$$

(4), (5) 식에서 보상 후 괄호내의 값이 양 (+) 이면 부족 보상, 음(-)이면 과보상, 영이면 완전 보상이라 한다. 동작을 단순화시켜 보기 위하여 완전 보상인 경우를 다루자. 이 경우의 phasor 도는 그림 5와 같다. 그림 5에서 1차 전류를 일정하게 유지하고 2차에 순수 저항부하가 연결된 경우를 가정하였다. 점선으로 표시된 것은 자기인덕턴스에서의 전압 강하와 이를 상쇄시키기 위한 커패시터에서의 전압 강하를 나타낸다. 2차에 저항성부하가 연결되어 2차에 흐르는 전류가 2차에 유기된 전압 $j\omega M\mathbf{I}_1$ 과 동상이면 1차에 유기되는 전압 $j\omega M\mathbf{I}_2$ 는 1차에 흐르는 전류와 동상이 된다.

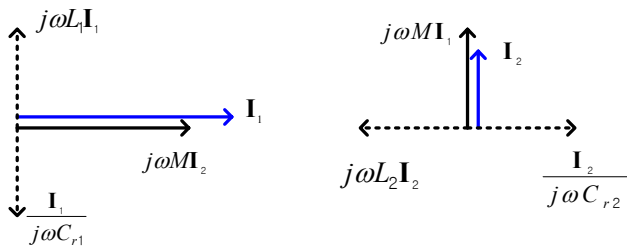


그림 5 양측 공진형 WPT 시스템에서의 phasor 도
Fig. 5 Phasor diagram of double-resonance WPT system

그림 3에서 권수가 N_2 이던 2차를 N_{22} , N_{23} 로 나누고 N_{23} 회 권선을 보조권선이라 하자. 그러면 그림 4(d)와 같이 3개의 coil로 구성된 다공진형의 시스템이 얻어진다. 설명의 편의상 나눈 두 권선은 결합계수가 1이라 하자. 그러면 나눈 두 권선의 자기 인덕턴스는 다음과 같이 주어진다.

$$L_{22} = \left(\frac{N_{22}}{N_2}\right)^2 L_2 \quad L_{23} = \left(\frac{N_{23}}{N_2}\right)^2 L_2 \quad (6)$$

그리고 상호인덕턴스는 다음과 같이 주어진다.

$$M_{12} = \frac{N_{22}}{N_2} M \quad M_{13} = \frac{N_{23}}{N_2} M \quad M_{23} = \frac{N_{22}N_{23}}{N_2^2} L_2 \quad (7)$$

보조권선은 커패시터(C_{r3})로 단락시키고 자기인덕턴스 (L_{23})를 과보상한 후 진상전류가 흐르도록 하여 순환하는 자속이 증가하도록 한다. 이것은 동기발전기에서 진상부하에 의해 자속이 증가하는 증자작용과 같다. 이 때의 페이저도는 그림 6과 같고 \mathbf{I}_3 은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{I}_3 = -\omega^2 C_{r3}' M_{13} \mathbf{I}_1 \quad (8)$$

여기서 보상 후의 등가 커패시턴스(C_{r3}')는 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{1}{\omega C_{r3}'} = \frac{1}{\omega C_{r3}} - \omega L_{23} \quad (9)$$

2차 권선에 부하 전류(\mathbf{I}_2)가 흐르면 보조권선에는 추가로 유기기전력이 발생하고 다음과 같은 전류(\mathbf{I}_3')가 흐른다.

$$\mathbf{I}_3' = \omega^2 C_{r3}' M_{23} \mathbf{I}_2 \quad (10)$$

M_{23} 은 M_{13} 에 비해 매우 크므로 전류 \mathbf{I}_3' 는 \mathbf{I}_3 에 비해 매우 큰 전류다. 그래서 \mathbf{I}_3 을 무시하면 보조권선과 2차 권선에 동일한 전류가 흐르는 것이 최상의 상태가 된다.

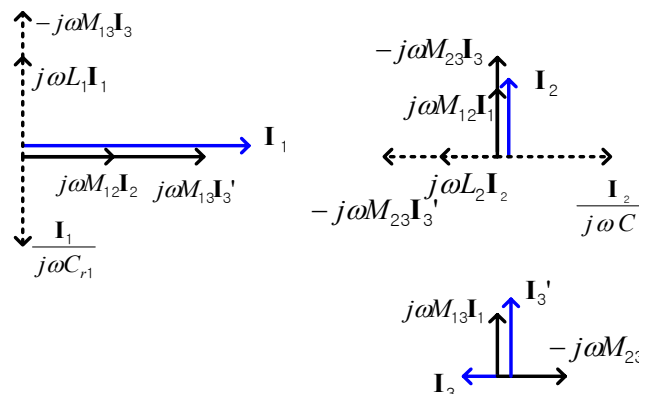


그림 6 pickup에 보조권선이 있는 시스템
Fig. 6 WPT system with auxiliary winding

식 (10)에서 $\mathbf{I}_3' = \mathbf{I}_2$ 되는 조건은

$$\omega^2 C_{r3}' M_{23} = 1 \tag{11}$$

이때에 1차 측에 유기되는 전 전압은 다음과 같이 주어지는데 그림 3의 2-coil 형에서와 같다.

$$j\omega M_{13} \mathbf{I}_3' + j\omega M_{12} \mathbf{I}_2 = j\omega M \mathbf{I}_2 \tag{12}$$

2차 측에 유기되는 전압은 다음과 같이 주어진다.

$$-j\omega M_{23} \mathbf{I}_3 + j\omega M_{12} \mathbf{I}_1 = j\omega M \mathbf{I}_1 \tag{13}$$

즉 2차 권선에 유기되는 전압이 그림 3에서와 같이 2-coil의 양측 공진형에서와 동일하다.

만일 \mathbf{I}_3' 가 \mathbf{I}_2 보다 크게 설계하면 전력은 \mathbf{I}_3' 때문에 제한되고, 1, 2차 전압은 2-coil인 경우보다 작아져 최대전력도 작아진다. 만일 \mathbf{I}_3' 가 \mathbf{I}_2 보다 작게 설계하면 전력은 \mathbf{I}_2 때문에 제한되고 이때에도 역시 1, 2차 전압은 2-coil인 경우보다 작아져 최대전력도 작아진다. 이로써 전력전달 면에서 KAIST의 보조권선이 있는 pickup이 낼 수 있는 최대전력은 보조권선이 없는 2-coil 시스템의 pickup과 동일함을 알 수 있고, 2-coil 시스템의 1, 2차는 가역적이므로 Auckland의 중계기가 있는 시스템은 동일한 크기로 중계기가 없는 2-coil 시스템으로 만들어도 전력전달 능력은 동일하다고 볼 수 있다. 동일한 방법을 적용하면 4-coil 시스템에서도 동일한 크기로 설계하면 동일한 출력을 낼 수 있음을 알 수 있다.

다음은 그림 7(a)와 같이 pickup의 부하에 병렬 커패시터 (C_{r2})를 추가하여 병렬공진을 도모한 경우를 검토하여 보자 [1],[10]. 즉, 이것은 일종의 임피던스 매칭을 시도한 것으로 볼 수 있는데 공진에 의해 정현파 전류가 흐른다고 가정하면 그림 7(b)와 같은 등가 회로로 볼 수 있다. 이 회로는 병렬 공진이라고도 하나 보다 정확히 말하면 병렬부하 직렬 공진회로(parallel-loaded series resonant circuit)이다. C_{r2} 는 공진 커패시터이면서 정류회로에서 발생할 수 있는 전압 스파이크를 제거하는 역할도 하여 정류회로의 소프트 스위칭 동작에 도움이 된다. 등가 저항 R_{eq} 는 다음 식으로 주어진다.

$$R_{eq} = \frac{8}{\pi^2} R_L \tag{14}$$

그림 7에서 2차 측의 임피던스는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_2 &= j\omega L_2 + \frac{R_{eq} \frac{1}{j\omega C_{r2}}}{R_{eq} + \frac{1}{j\omega C_{r2}}} \\ &= \frac{R_{eq} - \omega^2 L_2 C_{r2} R_{eq} + j\omega L_2}{1 + j\omega C_{r2} R_{eq}} \end{aligned} \tag{15}$$

여기서 공진의 조건, 즉 임피던스가 실수부 만 가지는 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$R_{eq}^2 = \frac{L_2}{C_{r2}(1 - \omega^2 L_2 C_{r2})} \tag{16}$$

또는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_{r2} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4 \left(\frac{\omega L_2}{R_{eq}} \right)^2}}{2\omega^2 L_2} \tag{17}$$

이 식들을 보면 공진의 조건이 부하에 따라 즉 R_{eq} 에 따라 바뀐다는 것을 알 수 있다. 이 회로는 그림 7(a)와 같이 출력을 커패시터 양단에서 인출하여 부하전압은 유도전압보다 높고 부하전류는 코일에 흐르는 전류보다 작은 특징이 있다. 또한 부하 저항이 다이오드 정류회로를 통하여 연결될 때 다이오드 정류회로가 소프트 스위칭을 하여 전압 스파이크가 없거나 적어지는 장점이 있지만 부하에 따라 공진회로의 구성을 변경하거나 매칭회로를 구비해야하는 단점이 있어 좋은 방식이라 할 수 없다[11]. 이에 비해 직렬 공진은 공진 조건이 부하 저항과 무관하다. 즉 그림 3에 나타난 1차와 2차에 직렬공진 회로로 이루어진 구성이 최적의 구성임을 알 수 있다.

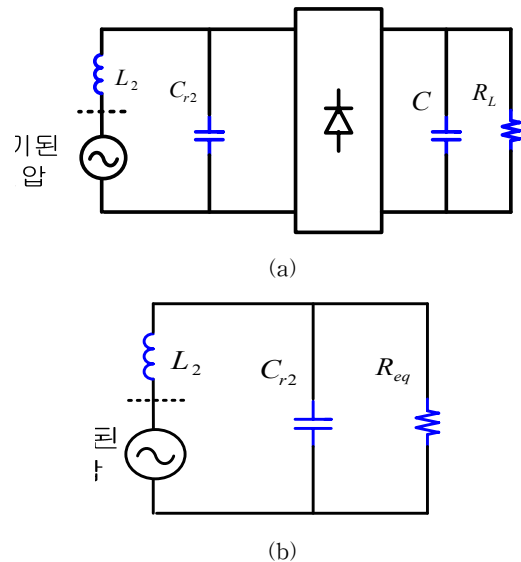


그림 7 병렬부하 직렬 공진형 WPT 시스템
Fig. 7 Parallel loaded series resonant WPT system

3. 결 론

본 논문에서는 현존하는 다양한 종류의 WPT 시스템 즉, coil을 2, 3 또는 그 이상을 사용하는 시스템이 비방사형이면 기본적인 동작이 동일하다는 것을 보였다. 중계권선, 보

조권선, 공진기 등과 같이 기본적인 2개의 coil 외에 더 많은 coil을 선택하는 것은 보조적인 기능이나 주파수에 따라 선택할 수 있는 부수적인 것으로 볼 수 있다. 2-coil 시스템에서는 설계가 매우 논리적으로 진행될 수 있다[12]. 이를 바탕으로 다공진형 WPT 시스템의 설계를 논리적으로 진행할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2009학년도 부경대학교 연구년 교수 지원사업에 의하여 연구되었음 (C-D-2009-0301)

References

[1] C.-S. Wang, O. H. Stielau and G. A. Covic, "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger", IEEE trans. Ind. elec. vol. 52, no. 5, pp.1308-1314, 2005.

[2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljagic, "Wireless Power Transfer via strongly coupled magnetic resonances", Science, vol. 317, no. 83, pp.83-86, 2007.

[3] 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. elec. vol. 56, no. 5, pp.1801-1812, 2009.

[4] A. Karalis, A.B. Kurs, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P.H. Fisher and M. Soljagic, "Wireless Energy Transfer", US 7825543 B2, 2010.

[5] J. Boys, "Inductive Power Transfer Across an Extended Gap", WO 98/50993, 1998.

[6] S. Dieckerhoff, M.J. Ryan and W. DeDoncker, "Design of an IGBT-based LCL-Resonant inverter for high-frequency induction heating", Proc. IEEE Industry Applications Conference, vol. 3, pp. 2039-2045, 1999.

[7] J.-E. Yeon, K.-M. Cho, W.-S. Oh and H.-J. Kim, "A dimmable high frequency resonant inverter for electrodeless lamps", Proc. of KIEE CICS'04, pp.487-489, 2004.

[8] S.-J. Jeon B.Y. Song, J.G. Shin, D.-W. Seo, S.J. Son, and D.-H. Cho, "Pickup with compensating winding for KAIST OLEV", Proc. of 42th KIEE Summer Conference, pp.3-4, 2011.

[9] J. Kim, H.-C. Son, D.-H. Kim, K.-H. Kim, Y.-J. Park, "Comparison of Characteristics between magnetic induction and magnetic resonance WPT using K inverter", Proc. of 42th KIEE Summer Conference, pp. 9-10, 2011.

[10] S.-H. Cheon, Y.-H. Kim, N.-L. Lee, and S.-Y. Kang, "Circuit model based analysis of a wireless

energy transfer system via coupled magnetic resonance", KIEE Trans. vol. 16, no. 2, pp. 137-144, 2011.

[11] S.G. Lee, H. Haong, Y.H. Choi and F. Bien, "Efficiency improvement for magnetic resonance based wireless power transfer with axial-misalignment", Electronics Letters, vol. 48, no. 6, pp. 339-340, 2012.

[12] D.-S. Lee, D.-N. Lim, S.-J. Jeon, "Pickup system design for wireless power transfer", Proc. of 42th KIEE Summer Conference, pp. 381-382, 2012.

저 자 소 개



이 동 수 (李東壽)

1979년 생. 2004년 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 전자정보통신공학전공 졸업. 2006년 부경대학교 전자공학과 공학석사. 2007년 3월 ~ 현재 부경대학교 전자공학과 박사과정.

E-mail : lds7933@naver.com



임 동 남 (林東男)

1987년 생. 2012년 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 전자정보통신공학전공 졸업. 2012년 3월 ~ 현재 부경대학교 전자공학과 석사과정.

E-mail : ldn8707@naver.com



전 성 줌 (田成緝)

1957년 생. 1980년 숭진대학교 전기공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사. 2001년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사. 1982년 3월~1985년 2월 한국과학기술원 연구원. 1985년 3월~1986년 8월 한국전기연구소 연구원. 1986년 9월 ~ 현재 부경대학교 교수.

Tel : 051-629-6216

E-mail : jeub@pknu.ac.kr