http://dx.doi.org/10.15207/JKCS.2015.6.2.057

융합형 어플리케이션을 위한 자기유도 방식의 무선전력전송 모듈설계에 대한 연구

정병호, 박주훈, 강보안*
남부대학교 의료공학과

A Study of the WPT Module Using Inductive Coupling for the Convergence Applications

Byeong-Ho Jeong, Ju-Hoon Park, Bo-An Kang*
Department of Biomedical Engineering, Nambu University

요 약 자기유도형 전력전송시스템은 의생명 임플란트, 해저 수송, 그리고 로봇의 무접촉 배터리충전 등에 대한 이동형 및 분리형 부하에 전력을 공급하는 물리적 접촉이 요구되는 기존의 방식을 대체하여 성공적으로 개발이 진행된 시스템으로 알려져 있다. 자기유도결합은 자기유도방식을 이용하여 전력을 전송하는 방식으로 1차측 코일(송전코일)에서 발생되는 자기장을 2차측코일에 전송하는 원리이다. 송전측 코일에서 발생된 자기장을 커패시터와 코일로 이루어진 2차측 코일(수전코일)로 구성된 리시버회로에 전송하는 구조로 송전부와 수전부 코일을 갖는 회로로 구성된다. 본 논문에서는 자기유도결합을 적용한 무선전력전송시스템에 대한 수전측 토폴로지 설계 및 적용방법에 대해 연구하였다. 적용된 무선 전력전송방식은 적용의 편리성과 폭넓은 어플리케이션으로 인해 다양한 융합형 응용장치의 적용이 가능하다.

• **주제어** : 무선전력전송, 자기유도방식, 유도결합방식, 융합형 어플리케이션, 리시버코일

Abstract Inductive Power Transfer (IPT) systems have successfully been developed and used to replace traditional conductive power transfer systems where physical connection is either inconvenient or impossible, such as biomedical implants, undersea vehicles, and contactless battery chargers of robots, for providing power to movable or detachable loads. Inductive Coupling uses magnetic fields to transfer power. There is a primary coil, which generates a magnetic field. Then there is another secondary coil which is composed of a capacitor and a coil, the capacitor creates a circuit with the primary and secondary coils. This paper discusses design method and several implementation alternatives for wireless energy transmission systems. It presents realization examples for these alternatives. Wireless energy transmission is investigated in numerous convergence applications due to its simplicity and advantages.

• **Key Words** : Wireless Power Transfer, magnetic Inductive Coupling, Inductive Coupling, Convergence applications, receiver coil

*교신저자 : 강보안(bakang@nambu.ac..kr)
접수일 2015년 2월 27일 수정일 2015년 4월 9일 게재확정일 2015년 4월 20일

1. 서 론

무선전력전송 시스템은 송전 측에서 수전 측으로 직접 전선을 연결하지 않아도 되는 장점이 있으며 직접 전선으로 연결되지 않으면 사용자가 전격 등에 노출되지 않아 안전성이 증가하고 전선으로부터 자유로워져 가동성 또는 편리성이 높은 구조의 에너지 전송방식이다[1]. 자기유도방식의 원리는 먼저 1차 코일(송전코일)에 전류를 흘리게 되면 자기장이 생성되며 그 자기장이 2차 코일(수전코일)에 유도 자기장을 발생시키고, 유도 자기장에 의해 2차 코일에 유도 전류가 생기고, 유도전류를 통해 2차 코일에 연결된 부하전력에 적합한 형태로 전력변환된 형태로 부하에 공급된다. 따라서 자기유도방식으로 충전하기 위해서는 송전시스템의 1차 코일과 수전시스템의 2차 코일이 필요하다[2,3].

전자기유도의 원리는 도선 주위의 자기장이 변하게 되면서 도선에 전류가 흐르는 원리로 1820년 패러데이가 발견했다[6,7]. 미국의 패러데이(Faraday)와 헨리(Henry)는 코일에 단순히 자석을 왕복운동함으로서 도선에 전류가 흐를 수 있다는 사실을 발견했고 코일내의 자기장을 변화시켜 전압이 유도되는 현상을 전자기유도라고 한다[4,5].

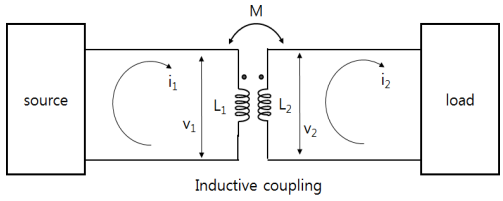
무선전력전송기술은 디지털 통신 및 산업용 기기들을 사용할 때 가장 큰 제약을 주는 전원 공급선을 없앨 수 있어 이전에 많은 연구가 이루어지고 있지만 전력 전송 효율이 높지 않고, 전자파의 인체 유해성과 같은 밝혀지지 않은 문제 등으로 인해 상용화 단계까지는 많은 어려움이 있다[6]. 공간적 전자유도 코일과 자성체인 코어를 적층하는 구조의 인덕터 회로를 설계하여 트랜스의 부피를 최소화하는 방향으로 모듈을 개발하면 정류회로와 DC-DC 컨버터를 더욱 소형화시킬 수 있어 공간사용의 측면에서 유리한 측면이 있다[7,8].

본 논문에서는 ISM(Industrial, Scientific, and Medical) 대역인 125kHz의 주파수를 이용하여 수 센티미터 이내의 거리까지 전력을 효율적으로 전달할 수 있는 송수신 코일을 설계하고, 무선전력전송을 성능을 확립할 수 있는 실험을 통해 3W급 저전력 어플리케이션에 적합한 형태의 토폴로지를 적용하였다. 특히, 본 연구를 통해 체내 이식형 마이크로펌프, 약물방출장치, 인공심장, 생체센서 등의 생체 삽입형장치의 전력공급장치로 적용하여 융합형 어플리케이션에 적용 가능하도록 설계방법을 제안하고 그에 따른 연구를 수행하였다.

2. 자기유도방식의 무선전력전송

2.1 자기유도방식 전력 전송 원리

유도성 전력 전송이 성립하기 위해서는 최소한 2개 또는 그 이상의 코일이 존재해야하고 두 번의 상호유도작용이 있어야 하며 공극을 통해 무선전력을 공급하는 송전 및 수전장치를 구성요소로 하는 전력공급방식을 의미한다[9,10]. [Fig. 1]은 무선전력전송장치의 자기유도방식에 따른 유도결합의 형태를 나타낸다.



[Fig. 1] Inductive coupling method for wireless power transfer

상호유도작용이란 한 코일에 흐르는 전류에 의해 다른 쪽 코일에 유도기전력이 발생하여 에너지를 전달하는 것을 의미한다. [Fig. 1]에서 L_1, L_2는 각기 1차와 2차의 자기 인덕턴스, M은 상호 인덕턴스다. 두 코일에서 두 번의 유도작용이 일어난 것은 식 (1), (2)와 같이 표현된다[11].

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

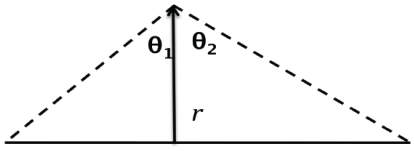
$$v_2 = M\frac{di_1}{dt} - L_2\frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

만일 1차 측과 2차 측의 전력 P_1과 P_2와 같이 유기된 전압과 전류의 곱의 시간적 평균이 영이 아니면 전력 전송이 발생한다. 이렇게 전력전송이 일어나는 것을 유도성 전력전송이라 한다[12,13]. 유도성 전력전송시스템은 선형시스템이고 가역적이다. 즉, 1, 2차는 그 기능을 서로 바꿀 수 있다. 코일내의 자기장을 변화시켜 전압이 유도되는 전자기유도는 직사각형의 커플된 코일이 전력전송 표면으로 작용하며 Biot-Savart's law를 적용하면 [Fig. 2]과 같이 직선도체로부터 거리 r만큼 떨어진 지점에서 자속밀도는 한쪽 끝과 θ_1의 각도를 만들고 다른 한쪽과

는 θ_2의 각도를 만들고 전류 I는 도체를 통해 흐르며 자속밀도는 식 (3)과 같다.

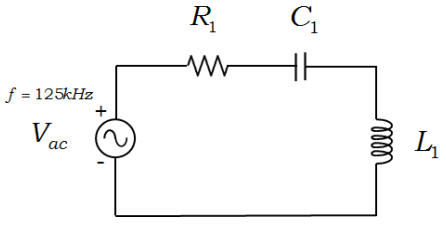
$$B=\frac{\mu_0 I}{4\pi r}(\sin\theta_2-\sin\theta_1) \tag{3}$$

여기서 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}H/m$으로 진공의 투자율이다.



[Fig. 2] r distance from the straight conductor

자기유도방식의 원리는 먼저 1차 코일에 전류를 흘리게 되면 자기장이 생성되며 그 자기장이 2차 코일에 유도자기장을 발생시키고, 유도 자기장에 의해 2차 코일에 유도 전류가 생기고, 유도전류를 통해 2차 코일에 연결된 부하에 전력을 공급하게 되므로 자기유도방식으로 충전하기 위해서는 송전시스템의 1차 코일과 수전시스템의 2차 코일이 필요하다[14,15].



[Fig. 3] Transmitting side topology of WPT

송전코측의 동조 캐패시터 C_1은 식 (4)과 같이 계산된다.

$$C_1=\frac{1}{\omega^2 L_1} \tag{4}$$

여기서 C_1은 동조캐패시터, L_1은 하나의 인덕턴스에 대한 안테나 코일이고 ω는 각속도로 $\omega=2\pi f$이다. 수전측의 동조 캐패시터 C_2는 식 (5)과 같다.

$$C_2=\frac{1}{\omega^2 L_2} \tag{5}$$

여기서 C_2는 동조 캐패시터이고 L_2는 두 개의 인덕턴스의 안테나 코일이고 식 (5)은 최적화 되지 않아서 C_2는 최적화하여 식 (6)으로 쓸 수 있다. 최적의 C_2의 값은 안테나 코일사이에서 결합계수에 의존한다. 품질계수 Q_1과 Q_2 최적의 C_2에 영향을 미친다.

$$C_2=\frac{1}{\omega^2 L_2\left(1+\frac{1}{Q_2^2}+k^2\frac{Q_1}{Q_2}\right)} \tag{6}$$

여기서 Q_1은 코일의 품질계수이고 Q_2는 두 번째 코일의 품질계수이다. k는 결합 계수이다. 부하저항 R_L은 또한 전력의 결합에 대해 최대효율을 갖기 위해서 최적화 되어야 한다. 최적의 부하는 다음의 식 (7)에 의해 계산될 수 있다.

$$R_L=R_2\frac{Q_2^2+1+k^2Q_1Q_2}{\sqrt{1+k^2Q_1Q_2}} \tag{7}$$

자기유도에 의한 쇄교인덕턴스는 전기회로에서 전류는 EMF를 유기시키고 전류의 변화를 제한한다. 전도루프의 자기 인덕턴스 L, 코일은 자기 인덕턴스 L의 파라미터를 갖는다. 자기 인덕턴스는 전류와 자속의 비율이다. 자기 인덕턴스는 공간 재료의 특성은 자속은 레이아웃의 구조에 따른다[16].

$$L=N\frac{\phi}{I}=\frac{\psi}{I}=N^2I \tag{8}$$

L은 코일의 인덕터스, ϕ는 자속, ψ는 자속쇄교이다. 기생캐패시터와 교류저항을 고려한 인덕터의 총 임피던스는 식 (9)과 같다.

$$Z_t=(j\omega L_{self})+R_{ac}\frac{1}{j\omega C_{self}} \tag{9}$$

따라서 코일은 유효 인덕턴스 L_{eff}를 포함하게 되고 식

(10)와 같다.

$$L_{eff} = \frac{L_{self}}{(1-\omega^2 L_{self} C_{self})} \quad (10)$$

유효 직렬저항 ESR(Effective series resistor)은 식 (11)과 같다.

$$ESR = \frac{R_{ac}}{(1-\omega^2 L_{self} C_{self})^2} \quad (11)$$

동작주파수가 자기공진주파수(SRF) 방향으로 증가하면 ESR은 급격하게 증가한다. SRF보다 높은 주파수에 대해 코일은 캐패시터와 같은 특성을 갖게 된다. 무부하 인덕터의 품질계수는 식 (12)과 같다.

$$Q_{unloaded} = \frac{\omega L_{eff}}{ESR} = \frac{2\pi f L_{eff}(1-\frac{f^2}{f_{self}^2})}{R_{dc}(1-\frac{f^2}{f_h^2})} \quad (12)$$

여기서 f_h는 직류 전력소비의 2배에 이르는 전력소비에 해당하는 주파수이다. 유도성 무선전력전송 시스템은 코일의 갯수와 자기 인덕턴스를 보상하는 정도에 따라 다양한 방식으로 분류될 수 있다.

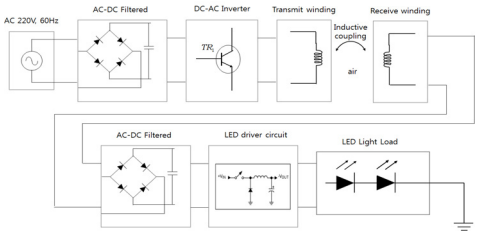
무선전력전송 효율(power transfer efficiency, PTE)은 무선전력전송회로의 효율을 결정하는 측정기준으로 입력전력 대 출력전력의 비율로 표현되며 코일의 Q-factor와 이들의 커플링 계수 k의 직접적인 연관을 갖는다. PTE에 대한 정의는 식 (13)과 같다.

$$\eta = \frac{k_{12}\sqrt{Q_1 Q_2}}{\sqrt{R_1 R_2}(1+k_{12}^2 Q_1 Q_2)} \quad (13)$$

코일의 높은 Q-factor는 전송부 전원과 부하저항이 우수한 커플링이 이루어짐을 의미한다. 최적의 물리적 전기적 파라미터의 설계를 통해서 높은 효율을 갖는 설계가 가능한 조건이다.

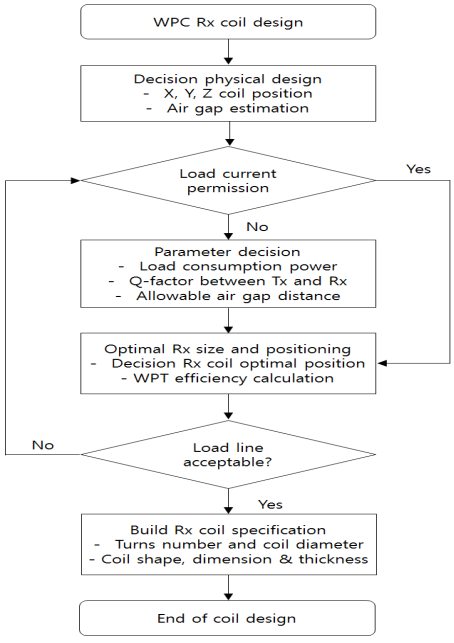
2.2 자기유도방식의 무선전력전송 토폴로지 설계 방법

본 연구를 통해 자기유도방식의 무선전력전송모듈은 LED부하를 시험하였고 [Fig. 4]는 실험을 위한 전자유도방식의 토폴로지의 구성을 블록다이어그램으로 나타낸다.



[Fig. 4] Circuit connection of the electromagnetic induction method.

자기유도방식의 최적설계방식을 제안하기 위해 요소기술 중에서 픽업코일로 불리는 수전코일(Receiver coil, Rx coil)의 역할과 기능이 중요하므로 이에 대한 다양한 구조와 전력요구량에 따른 다양한 구조를 갖도록 설계된다.



[Fig. 5] WPT optimal design flow chart

수전코일은 고효율 시스템설계에서 중요한 요소이고 많은 설계 반영요소가 있어 주의해야 할 사항이 많다. [Fig. 5]는 무선전력전송에 적용되는 수전코일의 설계프로세서를 나타낸다.

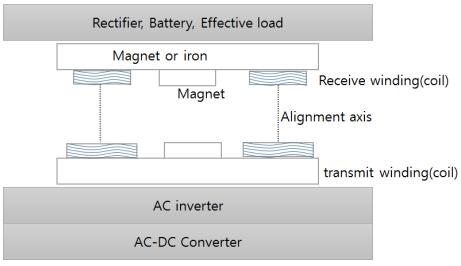
표준화 기구인 WPC에 의하면 기술개발에 따른 자기유도방식의 무선전력전송기술은 <Table 1>과 같은 4가지 요소가 무선전력전송기술을 구현하는데 중요한 요소로 규정하고 있으며 무선전력전송기술이 구현된 시스템의 설계시에 규정에 대한 대응 기술을 확립해야 한다.

[Table 1] Technical element against to technology reaction for the WPT

No.	Technical element	technology reaction
1	positioning technology	▪ mechanical design ▪ state monitoring technology
2	high frequency power transfer	▪ 125kHz frequency
3	coiling technology	▪ applying stack coil design ▪ applying nitz wire
4	EMI & EMC shield technology	▪ shield plate

무선전력전송의 후보 주파수로 고려되고 있는 대역은 수십kHz에서 수백 kHz 사이 또는 수MHz에서 수십 MHz 사이이며, 이 중에서 현재 가능한 주파수 대역은 125kHz 또는 134kHz 및 13.56MHz 정도이며 적용 주파수는 125kHz의 교류파를 생성하여 자기유도현상을 발생시켰다.

송전 코일은 외경이 43mm이고 내부 직경이 20.5mm, 두께는 2.1mm이고 한 개 층의 턴 수는 10[T]이다. [Fig. 6]는 코일의 구성과 형상을 나타낸다.



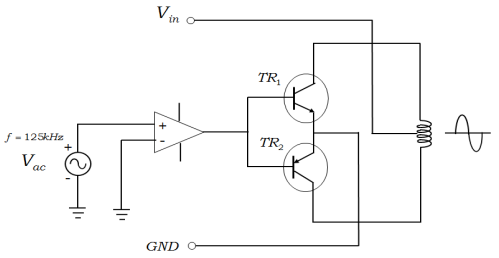
[Fig. 6] Coil design configuration

수전측 획득모듈은 이차 코일(Ls), 전파 브릿지 정류회로와 부하 연결 여부를 확인하기 위한 출력 스위치로 구성된다. <Table 2>는 전송코일의 주요사양을 나타낸다.

[Table 2] Specification of the transmittance coil design

No.	Parameter	Specification
1	Outer diameter	43 mm
2	Inner diameter	20.5 mm
3	Thickness	2.1 mm
4	Number of turns	10
5	Number of layers	2
6	Wire	20 AWG-type-2
7	Shield	Material 44

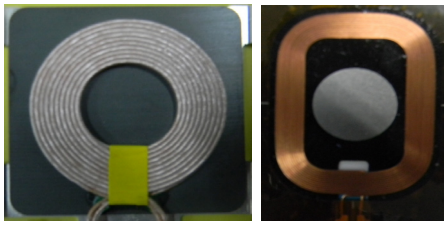
전력증폭기 회로는 B-calss의 Push-Pull 전력증폭회로로부터 구성하였다. [Fig. 7]은 B-class 전력증폭기회로를 나타낸다.



[Fig. 7] B-class push-pull Power amplifier

3. 실험결과 및 고찰

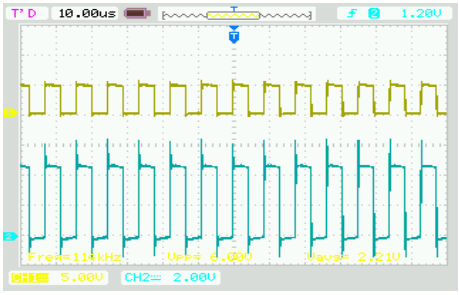
적용된 전송 모듈 토폴로지의 설계에 따른 전력전송 모듈은 DC-DC 컨버터, DC-AC 인버터, 송전코일(Lp)로 구성되고 전압과 주파수로 제어된다. 송전측은 50[mm]×50[mm]×1[mm]의 페라이트 PC 44로 쉴드플레이트를 구성하였다. 송전 및 수전간 거리는 3.4[mm]이다. 수전코일은 송전코일의 상단에 위치한다. [Fig. 8]은 송전코일과 수전코일의 사진을 각각 나타낸다.



(a) transmitter litz coil (b) receiver coil

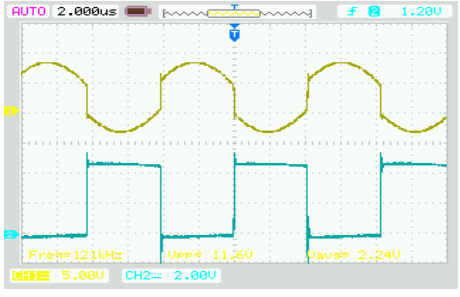
[Fig. 8] Photo of transmit and receive coil

[Fig. 9]은 제어신호와 송전 코일 전압을 나타낸다. CH1은 5V제어신호의 발생을 나타내고 CH2는 송전코일에 인가되는 전압파형을 나타낸다.



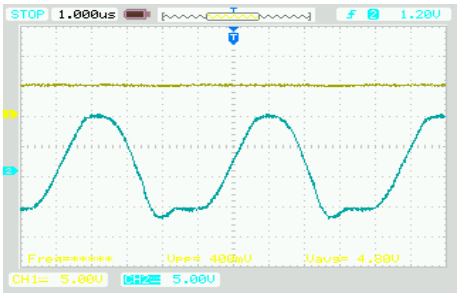
[Fig. 9] Control signal waveforms for power transmittance

[Fig. 10]은 송전 코일 전압과 파형을 나타낸다. 송전코일의 출력전압과 인덕터의 출력전압의 파형을 나타내며 주파수 125[kHz]로 동작됨을 확인할 수 있다.



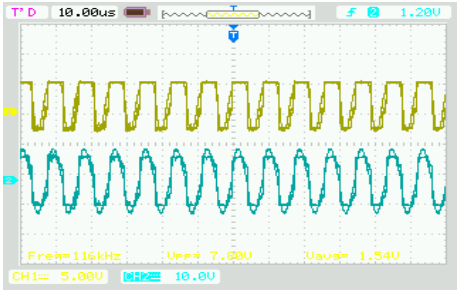
[Fig. 10] Inductor output waveforms and control signal for power transmittance

레귤레이터는 수신 코일로부터 수신된 전압을 정류하여 충전용전지에 충전 가능하도록 일정한 전압을 공급한다. [Fig. 11]은 수전코일 정류전압과 수전코일의 전압을 나타낸다.

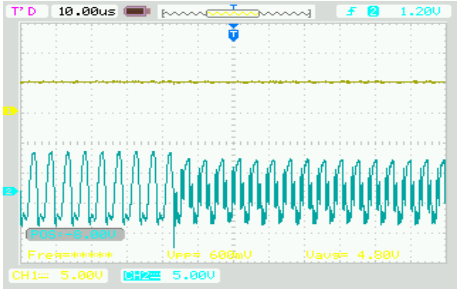


[Fig. 11] Rectifying voltages and receiver coil waveforms

[Fig. 12]은 수전측 정류전압과 수전코일의 전압을 나타낸다.



(a) Voltage output waveforms of receiving side coil



(a) Receiver and rectifying voltage waveforms of receiving side coil

[Fig. 10] Rectifying voltages of the receiving side and receiving coil

4. 결론

본 논문에서는 125kHz의 WPC표준규격에 적합한 자기유도방식의 토폴로지를 설계방법을 제시하였고 이를 구현한 시작품의 실험을 통해 출력특성과 무선전력전송 모듈의 성능에 대한 실험을 수행하였다. 자기유도형 무

선전력전송모듈의 설계를 통해 전송된 에너지를 이용하여 LED부하와 충전용회로 설계를 통해 효과적으로 부하에 전력을 공급하는 과정을 제안하였으며 또한, 에너지 전송 용량은 3W 저전력 무선전력전송모듈의 규모에 적합한 토폴로지와 전력증폭기에 대한 연구를 진행하였다. 수전측 토폴로지설계에 따른 전력의 전송과 부하에 공급되는 에너지의 상태를 검증하여 양호한 전력전송과정을 확인하였다.

향후 10W급 이상의 전력전송 어플리케이션에 적용하여 의생명 임플란트나 수중 전력전송 등 폭넓은 활용가능성을 확대이용 할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

[1] U.K. Madawala D.J. Thrimawithana “Current sourced bi-directional inductive power transfer system”, IET Power Electron., Vol. 4, Iss. 4, pp. 471 -80, 2011.

[2] Takehiro Imura, Yoichi Hori, “IEEE Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 10, October 2011.

[3] Dukju Ahn and Songcheol Hong, “A Study on Magnetic Field Repeater in Wireless Power Transfer”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 1, 2013.

[4] Udaya K. Madawala, Duleepa J. Thrimawithana, “A Ring Inductive Power Transfer System”, IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2010.

[5] Byeong-Ho Jeong, Kang-Yeon Lee, Nam-In Chung, “digital PID controller design for the heat and cool injection mold system”, The 20th International Conference on Electrical Engineering, pp.15-19, 2014.

[6] Nausheen Bilal, Aisha Jilani, Hamna Hamid, Ayesha Inayat, Sana Naeem, Nimra, “Circuit-Model Based Analysis of Wireless Energy Transfer System Using Inductive Coupling”, Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, Vol. 5, No. 10, 2014.

[7] Pratik Raval, Dariusz Kacprzak, Aiguo P. Hu, “A Wireless Power Transfer System for Low Power Electronics Charging Applications”, 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2011.

[8] Seung-Hwan Lee, Robert D. Lorenz, “Development and Validation of Model for 95%- Efficiency 220-W Wireless Power Transfer Over a 30-cm Air Gap”, Transactions on Industry Applications”, Vol. 47, No. 6, 2011.

[9] M. Fareq, M. Fitra, M. Irwanto, Syafruddin. HS, N. Gomesh, Farrah. S, M. Rozailan, “Solar Wireless Power Transfer Using Inductive Coupling for Mobile Phone Charger”, 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014), Langkawi, The Jewel of Kedah, Malaysia. pp. 24-25 March, 2014.

[10] Leyh, G.E. , Kennan, M.D., “Efficient Wireless Transmission of Power Using Resonators with Coupled Electric Fields″ 40th North American Power Symposium, 2008.

[11] J.T. Boys, G.A. Covic, and A.W. Green, “Stability and control of inductively coupled power transfer systems,” IEE Proceedings of Electric Power Applications, Vol. 147, No. 1, pp. 37-43, 2000.

[12] J.-U.W. Hsu, A.P. Hu, A. Swain, X. Dai, and Y. Sun, “A new contactless power pick-up with continuous variable inductor control using magnetic amplifier,” in PowerCon 2006 International Conference on Power System Technology. 2006.

[13] ‘Wireless Power: Wireless charging and transmission for mobile devices, consumer electronics, electric vehicles, industrial markets, and military applications, ’Pike Research, 2010.

[14] Proceedings of IEEE MTT-S international microwave workshop series (IMWPS) on innovative wireless power transmission: Technologies, systems, and applications (IMWS-IWPT), Kyoto, Japan,

2011.

[15] Hansu Shin, Jin-Kyu Byun, "Efficiency and EMF Safety Analysis of Wireless Power Transfer System Using Standard Human Model", Journal of the Korean Institute of IIluminating and Electrical Installation Engineers Vol. 27, No. 11, pp. 96-103, 2013.

[16] J.-U.W. Hsu, A.P. Hu, and A. Swain, "A wireless power pick-up based on directional tuning control of magnetic amplifier," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 7, pp. 2771-2781, 2009.

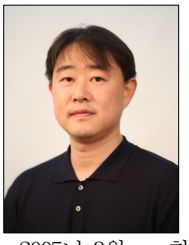
저자소개

정 병 호(Byeong-Ho Jeong) [정회원]

- 2006년 8월 : 조선대학교 전기공학과(공학박사)
- 2006년 4월 ~ 2009년 2월 : (주) 기영미다스 선임연구원
- 2009년 2월 ~ 현재 : 남부대학교 신·재생에너지기술연구소장
- 2009년 2월 ~ 현재 : 남부대학교 의료공학과 교수

<관심분야> : 컴퓨터제어공학, 의공학, 의료기기

박 주 훈(Ju-Hoon Park) [정회원]



- 1998년 2월 : 동신대학교 물리학과(이학사)
- 2000년 2월 : 동신대학교 대학원 물리학과(이학석사).
- 2006년 2월 : 전남대학교 대학원 광공학과(공학박사).
- 2005년 3월 ~ 현재 : 남부대학교 의료공학과 교수

<관심분야> : 의료기기, 의공학, 의광학

강 보 안(Bo-An Kang) [종신회원]

- 1998년 2월 : 전남대학교 무기재료공학과 (공학박사)
- 1987년 1월 ~ 1997년 6월 : 한국유리연구소 (선임연구원)
- 1998년 3월 ~ 2004년 2월 : 인천전문대학 기계과(강사)
- 2004년 1월 ~ 현재 : 남부대학교 의료공학과 교수

<관심분야> : 의공학, 생체재료, 의광학