

# 전력구 내 지중선을 이용한 2W급 상용주파수 무선전력 수신장치 개발

장기찬<sup>1</sup>, 최보환<sup>1</sup>, 임춘택<sup>†</sup>

## Development of 2W-Level Wireless Powered Energy Harvesting Receiver using 60Hz power line in Electricity Cable Tunnel

Gi-Chan Jang<sup>1</sup>, Bo-Hwan Choi<sup>1</sup>, and Chun-Taek Rim<sup>†</sup>

### Abstract

Using high magnetic flux from a 60 Hz high-current cable, a 2 W wireless-powered energy harvesting receiver for sensor operation, internet of things (IoT) devices, and LED lights inside electrical cable tunnels is proposed. The proposed receiver comprises a copper coil with a high number of turns, a ring-shaped ferromagnetic core, a capacitor for compensating for the impedance of the coil in series, and a rectifier with various types of loads, such as sensors, IoT devices, and LEDs. To achieve safe and easy installation around the power cable, the proposed ring-shaped receiver is designed to easily open or close using a clothespin-shaped handle, which is made of highly-insulated plastic. Laminated silicon steel plates are assembled and used as the core because of their mechanical robustness and high saturation flux density characteristic, in which the thickness of each isolated plate is 0.3 mm. The series-connected resonant capacitor, which is appropriate for low-voltage applications, is used together with the proposed receiver coil. The concept of the figure of merit, which is the product weight and cost of both the silicon steel plate and the copper wire, is used for an optimized design; therefore, the weight of the fabricated receiver and the price of raw material is 750 gf and USD \$2 each, respectively. The 2.2 W powering capability of the fabricated receiver was experimentally verified with a power cable current of 100A<sub>rms</sub> at 60Hz.

**Key words:** WPT(Wireless Power Transfer), Rated power frequency, Energy harvesting, Electricity cable tunnel

### 1. 서 론

최근 도심환경 미화 및 국민안전 개선을 위하여 기존 전신주 및 철탑에 설치된 전력선을 지중선으로 교체하는 작업이 활발하게 이루어지고 있다. 그림 1과 같이 지중선 설치를 위하여 지하 전력구를 사용할 경우, 전력구 내부의 유지보수를 위한 조명공급 및 온·습도 등의 주변 환경 모니터링이 필수적이다. 이러한 조명 및 센서 구동

을 위하여 유선 혹은 배터리를 이용한 전원공급이 일반적이었다. 하지만 장거리의 전력구 내부에 추가적인 유선 전원을 설치할 경우 시공비용이 급증하며, 정전 및 사고시의 소등환경에서도 지중선 식별을 위한 조명 및 센서에 전원을 공급할 수 있는 반영구적인 방법이 필요하다.

지중선 전력구에 필요한 조명 및 각종 센서에 필요한 전력을 분석한 결과 그림2와 같이 에너지 하베스팅에 적합한 전력범위는 각종 센서 및 부가장치를 위한 10nW에서부터 LED 조명을 구동하기 위해 최대 2W가 필요하다. 따라서 제안하는 에너지 하베스팅 장치는 최대 2W의 전력을 생산하도록 설계되었으며, 2W 이하의 전력이 필요한 경우는 본 장치의 크기 및 설계변수를 조정하여 적용 가능한 설계 방법을 본 논문에서 제안한다.

Paper number: TKPE-2016-21-4-3

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: [ctrim@kaist.ac.kr](mailto:ctrim@kaist.ac.kr), Dept. of Nuclear and Quantum Eng., KAIST

Tel: +82-42-350-3827 Fax: +82-42-350-5861

<sup>1</sup> Dept. of Nuclear and Quantum Eng., KAIST  
Manuscript received Jan. 15, 2016; revised Mar. 15, 2016;  
accepted May 17, 2016

TABLE I  
ENERGY HARVESTING METHODS

	Pros.	Cons.	Availability
Solar energy	<ul style="list-style-type: none"> <li>No EMI/EMF problem</li> <li>Easy to install</li> <li>Large amount of energy source</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Depending on weather condition</li> <li>Need large area</li> <li>Fragile structure</li> </ul>	X
Piezoelectric energy	<ul style="list-style-type: none"> <li>No EMI/EMF problem</li> <li>Light weight</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Problem of wear</li> <li>Expensive</li> </ul>	X
Thermal energy	<ul style="list-style-type: none"> <li>No EMI/EMF problem</li> <li>No vibration/noise problem</li> <li>Long life cycle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High energy production cost</li> <li>Low conversion efficiency</li> </ul>	X
RF energy	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abundant in ambient</li> <li>Widely available</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Distance dependence</li> <li>Low power density[W/cm<sup>2</sup>]</li> </ul>	X
Magnetic energy	<ul style="list-style-type: none"> <li>High output power</li> <li>Simple structure</li> <li>Insensible to environment change</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High EMI/EMF</li> <li>bulky</li> </ul>	O



Fig. 1. Electricity cable tunnel environment.

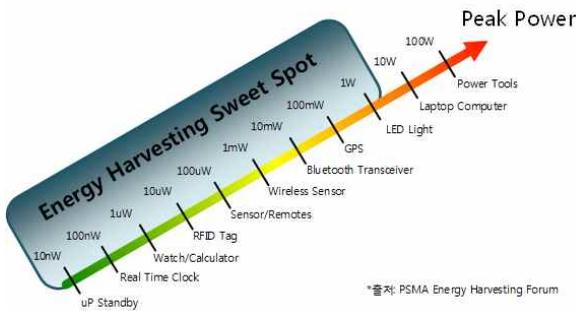


Fig. 2. Energy harvesting output power range.

각종 사고 및 정전 상황에서도 센서 및 조명에 외부 전원 없이 안정적으로 전원을 공급하기 위해 표 1과 같이 다양한 에너지 하베스팅 방법 중 지중선 환경과 필요한 전력량을 고려하여 자기장 방식을 적용한 장치를 선정했다. 이와 비슷한 문제를 해결하기 위하여 선박 및 특수 목적으로 전류가 흐르는 전선의 자기장을 이용한 에너지 하베스팅 기술이 제안되었으나, 일반적으로 수십~수백 mW급의 작은 전력을 생산하며, 상용제품으로 바로 사용하기에는 설치 및 거치가 용이하지 않다 [1]-[3].

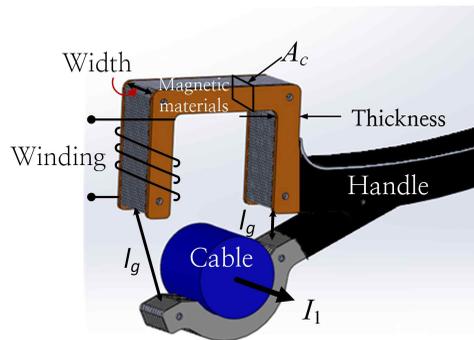


Fig. 3. Proposed wireless power receiver.

본 논문에서는 그림 3과 같이 집게 형태의 수신 장치를 제안하여 두꺼운 지중선에 설치가 용이하며 일반적으로 고압·고전류의 위험한 작업환경에서 작업자의 안전을 보장할 수 있다. 제안하는 수신장치는 그림 1의 3상 지중선 3가닥 중 하나의 전선을 감싸는 형태이며, 자성체 및 구리도선을 포함하는 수신코일, 장치의 개폐를 위한 손잡이, 그림 4의 직렬공진회로 및 정류기를 포함하는 부가회로로 구성된다. 높은 기계적 강도 및 포화 자속밀도를 가지는 규소강판 박편들을 각각 절연 후 접합하여 자성체를 구현하였으며, 수신코일의 임피던스를 직렬 공진 커패시터로 보상하여 최대전력을 수신하였다<sup>[4]</sup>. 스프링으로 고정되는 집계를 사용한 손잡이는 장치의 설치 및 제거 시 작업자가 지중선에 접촉하지 않도록 도와준다.

낮은 동작주파수(50~60 Hz)를 가지는 무선전력 수신 장치의 특성상 필연적으로 장치의 부피 및 무게가 커지는 고질적인 문제를 완화하기 위하여 수신코일의 무게와 가격의 곱을 성능지수(Figure of Merit, FoM)으로 나타내어 부피 및 무게를 최소화하여 최종적으로 가격

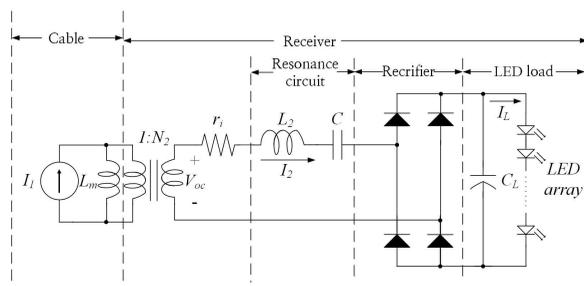


Fig. 4. Overall circuits of the device.

TABLE II  
DESIGN PARAMETERS FOR PROPOSED WIRELESS  
POWER RECEIVER

Fixed variables		Design variable		Dependent variable	
$f_s$	Frequency	$N$	Number of turns	$I_i$	Parasitic resistance
$\mu_r$	Relative permeability	$A_c$	Cross section area	$I_2$	Rx current
$I_1$	Tx current	$d_w$	Coil diameter	$B_c$	Flux density
$B_m$	Saturation flux density	$l_g$	Airgap	$P_o$	Output power

※ fs = 60 Hz,  $\mu_r = 2,000$ ,  $I_s = 100$  Arms,  $B_m = 1.5$  T

을 최소화할 수 있는 설계를 수행하였다. 100Arms의 지중선 환경을 모사하여 2.2 W LED 부하를 구동하는 시작품을 제작하였으며, 제작된 시작품의 무게와 재료비는 각각 750 g중, 2,400원이다.

## 2. 제안하는 2W급 무선전력 수신장치 설계

제안하는 수신장치의 설계에 사용되는 변수를 표 1과 같이 고정변수와 설계변수 그리고 종속변수 3가지로 분류하였다.

고정 변수 중 주파수는 상용주파수인 60 Hz, 지중선 전류는 100 Arms로 주어진다. 자성체의 상대투자율 및 포화자속밀도는 재료에 따라 달라지나 본 논문에서는 투자율 2,000, 포화자속밀도 1.5 T의 특성을 가지는 규소강판을 사용하였다.

종속변수 중 자성체 내부의 자속밀도는 지중선으로부터 발생하는 자속밀도와 수신코일 전류로부터 발생하는 자속밀도의 벡터합으로 주어지며 이는 규소강판의 포화 자속밀도보다 낮아야 한다<sup>[5]</sup>. 코일 내부저항은 구리 도선의 도선 저항 및 자성체의 철손을 포함한 값이다. 향후 성능지수를 사용하여 2 W의 출력전력을 목표로 수신코일의 권선 수, 자성체 단면적, 코일 반지름, 공극 등이 설계되었다.

### 2.1 등가회로 해석

그림 5(a)는 제안하는 수신장치의 자성체 및 코일을 나타낸다. 수신코일 인덕턴스와 공진하는 커패시터를 사

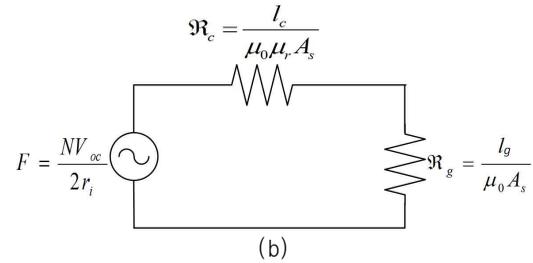
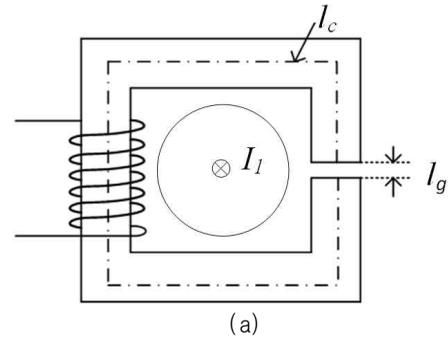


Fig. 5. Equivalent model (a) and magnetic circuit model (b) of the receiver

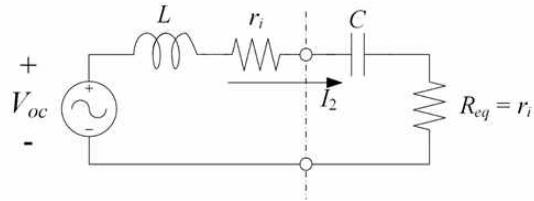


Fig. 6. Equivalent receive circuit at maximum power condition.

용하여 수신코일 전류의 위상은 지중선 전류와 90도 위상차를 가진다. 따라서 자성체의 자속밀도  $B_c$ 는 (1)과 같이 지중선 전류로부터의 자속밀도  $B_1$ 과 수신코일 전류로부터의 자속밀도  $B_2$ 의 벡터합으로 나타나며, 이때  $B_1$ 과  $B_2$ 는 각각 그림 5(b)의 등가 자기회로를 사용하여 (2), (3)와 같이 구해진다.  $B_1$ 은 일반적으로  $B_2$ 보다 작으며  $B_c$ 는 1.5 T가 되도록 공극  $l_g$ 가 설계되어야 한다.

$$B_c = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} < B_{\max} \quad (1)$$

$$B_1 = \frac{\Psi_1}{A_c} = \frac{\mu_0 \mu_r I_1}{l_c + \mu_r l_g} \quad (2)$$

$$B_2 = \frac{\Psi_2}{A_c} = \frac{\mu_0 \mu_r N V_{oc}}{2 r_i (l_c + \mu_r l_g)} \quad (3)$$

그림 6은 직렬공진회로를 포함하는 수신코일 등가회로를 나타내며, 그림6 및 (3)에서 사용된 수신코일의 유기전압  $V_{oc}$ 는 페러데이의 법칙으로부터 (4)와 같이  $B_1$

TABLE III  
VARIABLES USED IN FOM

$W_c$	Copper weight	$W_s$	SiFe sheet weight	$W_t$	Total weight
$E_c$	Copper cost	$E_s$	SiFe sheet cost	$E_t$	Total cost
$\rho_c$	Copper density		$\rho_s$	SiFe sheet density	
$K_c$	Copper unit cost		$K_s$	SiFe sheet unit cost	

을 사용하여 나타낼 수 있으며, (2),(4)에 의해  $B_2$ 는 (5)와 같이 지중선 전류에 대한 수식으로 다시 정의할 수 있다.

$$V_{oc} = \omega_s N_2 B_1 A_c \quad (4)$$

$$B_2 = \left( \frac{\mu_0 \mu_r N}{l_c + \mu_r l_g} \right)^2 \frac{\omega A_c I_1}{2r_i} \quad (5)$$

공진주파수에서 출력 전력은 (6)과 같이 표현되며 다이오드 정류기 및 LED 부하를 나타내는 등가저항  $R_{eq}$ 는 수신코일 내부저항과 동일한 값으로 선택되어 공진주파수에서 최대전력 수신을 가능하게 한다.

$$P_o = \frac{V_{oc}^2}{4R_{eq}} = \frac{V_{oc}^2}{4r_i} \quad (6)$$

### 2.2 성능지수를 사용한 최적설계

성능지수는 장치의 질량과 가격을 비교하는데 사용하는 값으로 낮은 동작주파수에서 코어의 부피가 커지게 되는 문제를 해결하기 위해 성능지수를 이용하여 최적설계를 수행하였다. 수신코일의 무게와 가격의 곱을 성능지수(FoM)으로 나타내어 목표 출력 전력인 2 W를 만족하며 동시에 최저 가격 최소 무게를 가지는 수신장치를 설계하였다. (11)은 성능지수를 나타내며, 이 때 사용된 변수는 (7)~(11) 및 표 2와 같이 정의된다.

$$W_s = A_s \times l_s \times \rho_s \quad (7)$$

$$E_s = W_s \times K_s \quad (8)$$

$$W_c = A_c \times l_c \times \rho_c \quad (9)$$

$$E_c = W_c \times K_c \quad (10)$$

$$FoM = (W_s + W_c)(E_s + E_c) \quad (11)$$

성능지수를 계산하기 위한 자성체의 기본형상은 그림 7과 같다. 권취할 공간 및 지중선이 삽입될 공간을 고려하여 코어의 기본 형상을 설계했으며, 차후 사용자의 편의를 고려하여 장착 될 손잡이를 위한 구멍 및 돌기를 추가했다. 권선수와 코어의 두께, 공극 그리고 코어의 너비를 변화시키며 최적의 성능지수를 찾기 위한 그래프가 그림8과 같이 나타낼 수 있다.

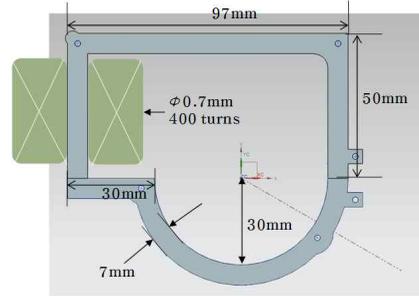


Fig. 7. Front view of the receiver.

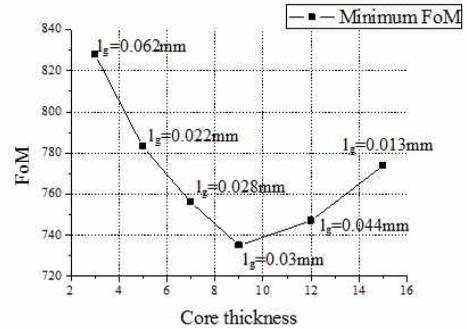


Fig. 8. Minimum FoM with respect to core thickness

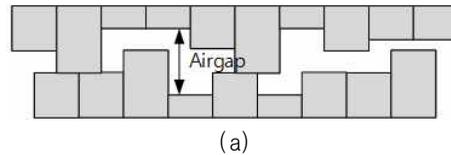


Fig. 9. Core arrangement section (a) and shorted surface(b)

그림 8의 결과에 따라 최소의 공극 0.03mm로 선정하면 0.03mm의 공극 제작에 어려움이 있었으며, 적층된 규소강판이 균일하게 적층되지 않아 접촉면에서 공극차이가 그림 9와 같이 생겨 부분적인 포화가 발생했다. 접촉면을 평탄하게 만들어 공차를 없애기 위해 포면을 그라인딩하면 절연이 파괴문제로 표면이 단락되어 접촉면에서 와류손에 의한 손실이 증가하는 문제가 발생했다.

따라서 시작품 제작을 고려하여 성능지수에 아래 두 가지 제약사항을 추가하여 최적설계를 다시 수행하였다.

1) 시작품 공정오차를 고려하여 수신코일의 공극  $l_g$ 는 최소 0.1mm 이상이어야 한다.

2) 설치환경을 고려하여 수신코일 자성체의 두께는

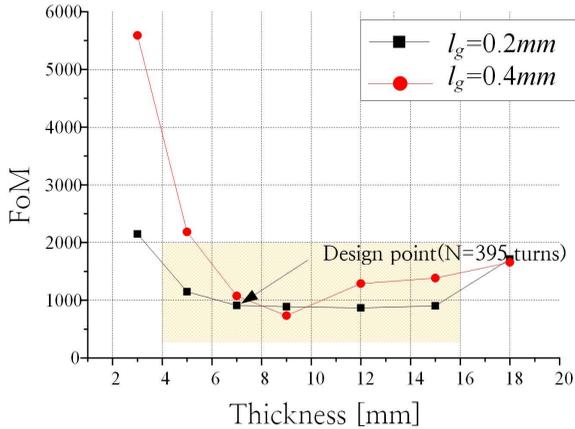


Fig. 10. Total weight according to thickness after setting the minimum airgap.

TABLE IV  
THE NUMBER OF TURNS ACCORDING TO THICKNESS

Thickness[mm]	3	5	7	9	12
# of turns	1,650	485	395	360	345

TABLE V  
UNIT PRICE AND DENSITY OF COPPER AND SILICON STEEL SHEET

	Copper	Silicon steel (0.3mm/sheet)
E (KRW/kg)	7,694	4,420
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	8,960	7,650

10mm 이하이어야 한다.

상기 제약사항을 고려하여 자성체 자속밀도 1.5T 이하, 출력전력 2W 이상 조건에서 가격과 무게를 최소화하는 성능지수는 그림 10과 같이 나타낼 수 있다. 자성체는 도합 두 개의 공극을 가지며, 공극이 작을수록 낮은 성능지수를 가지나 제약사항 1)을 고려하여 공극을 0.1mm 및 0.2mm로 고정된 후에 성능지수를 공극을 비교하였다. 그림 6과 같이 자성체의 두께가 5mm에서 12mm사이일 때 최저의 성능지수는 최저점을 가진다. 또한 3상 전력선 사이에 들어가야 하므로 두께는 얇을수록 유리하다. 하지만 표 4와 같이 코어의 두께가 5mm 이하일 때 권선수가 급격히 증가하는 문제가 발생하여 장치의 부피 및 성능지수가 증가하였다. 따라서 위의 제약사항을 고려하여 각 공극은 0.1mm, 자성체의 두께는 7mm로 선정되었다. 사용된 구리 및 규소강판의 단위가격 및 밀도는 표 3과 같다.

2.3 지중선 전류의 변동 및 부하 영향

본 장치는 지중선에 100A가 흐른다고 가정하고 100A에서 최적화 되도록 설계되었기에 지중선에 흐르는 전



Fig. 11. (a) 60Hz 2W Wireless receiver prototype and (b) LED light operating.

류의 크기가 변하게 되면 무선전력 수신장치에서 얻을 수 있는 전력도 변하게 된다. 지중선에 흐르는 전류의 변동은 수신장치 내부의 자기장에 영향을 미치고 유기전압의 변동은 전력에 영향을 주게 된다. 만약 부하전류가 감소하게 된다면 수신되는 전력이 감소하고, 부하전류가 증가하게 된다면 자성체의 포화자속밀도를 초과하게 되어 수신장치가 더이상 정상적으로 동작할 수 없게 된다. 현재 장치는 특정 조건에서 최적화 된 설계로 전류의 변동분에 대한 내성이 높게 설계되지 않았다. 만약 전류변동분에 대해 고려하게 된다면 자성체의 너비를 증가시켜 적은 전류에서는 높은 전압을, 큰 전류에서는 자성체의 포화를 피하는 방향으로 설계할 수 있다.

무선전력수신기가 10m 간격으로 2W의 장치를 설치한다면 구간 당 200W/km의 손실이 발생하게 된다. 전체 송전선의 길이가 60km라고 가정한다면 장치에서 소모하는 전력은 최소 12kW가 된다. 본 장치의 실시예인 22.9kV 지중선에 100A가 흐르면 송전전력은 2.3MW가량이므로 수신장치에서 소모하는 전력은 송전전력에 비해 약 0.5% 수준이다. 본 장치의 적절한 설치 개수에 대한 논의 및 검증은 차후 추가실험이 필요하다.

3. 실험 결과

그림 8(a)의 시작품 제작을 위하여 설계변수는 N = 400, Ac = 154mm<sup>2</sup>, dw = 0.35mm, lg = 0.2mm로 선정되었으며 이것의 정면도는 그림 7에 나타나있다. 자성체의 와류손을 줄이기 위하여 80장의 0.3mm 규소강판을 절연 후 적층하여 자성체를 제작하였다. 30개의 LED를 부하로 사용하였으며, 수신코일 등가저항인 13Ω을 고려하여 3직렬 10병렬로 연결하여 최대 전력을 수신하였다. 110 mH의 수신코일 인덕턴스와 60 Hz에서 공진하도록 극성이 반대로 연결된 전해 커패시터들을 사용하여 직렬 공진회로를 구성하였다. 낮은 순방향 전압을 가지는

쇼트키 다이오드를 사용하여 LED 부하와 연결된 전파 정류기를 구성하였다.

그림 8(b)과 같이 100 Arms의 지중선 환경을 모사하여 실험을 수행하였으며 LED 부하의 전압과 전류는 각 5.9 V, 375 mA로 2.2 W 출력전력을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 논문은 지중선 또는 전력선에서 발생하는 상용주파수 자기장을 사용하는 2 W급 무선전력 수신장치를 제안하였다. 제안하는 집게 형태의 구조는 기존의 전력선 부착용 에너지 하베스팅 장치에 비하여 작업자의 안전 및 설치시간을 크게 개선할 수 있다. 다른 회로 소자에 비하여 비교적 고가인 규소강판 및 구리선의 가격 및 무게를 최소화 하는 최적설계를 수행하여 최종 시제품의 무게는 750 g중 이하, 재료비 단가는 2,400원 이하로 낮출 수 있었다. 본 논문에서 제안된 설계과정을 응용하면 향후 수십 mW의 사물인터넷부터 수 W 이상의 조명까지 다양한 산업분야에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

#### References

- [1] J. Y. Moon and S. B. Leeb, "Enhancement on energy extraction from magnetic energy harvesters," in *IEEE ECCE conf.*, pp. 427-434, 2015.
- [2] V. Särkimäki, T. Ahonen, R. Tiainen, J. Ahola, and T. Lindh, "Analysis of the requirements for an inductively coupled power supply for a wireless sensor," in *NORPIE.*, 2006.
- [4] J. Ahola et al., "Design considerations for current transformer based energy harvesting for electronics attached to electric motor," in *IEEE SPEEDAM. conf.*, pp. 901 - 905, Jun. 2008.
- [4] R. H. Bhuiyan, R. A. Dougal, and M. Ali, "A miniature energy harvesting device for wireless sensors in electric power system," *IEEE Sensors Journal.*, Vol. 10, No. 7, pp. 1249 - 1258, Jul. 2010.
- [5] S. Y. Choi, J. Huh, W. Y. Lee, and C. T. Rim, "Asymmetric coil sets for wireless stationary EV chargers with large lateral tolerance by dominant field analysis," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 12, pp. 6406-6421, Dec. 2014.



#### 장기찬(蔣基讚)

1990년 11월 4일생. 2015년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업. 2015년~현재 KAIST 원자력 및 양자공학과 석사과정.



#### 최보환(崔輔煥)

1988년 2월 26일생. 2011년 성균관대 전기공학과 졸업. 2016년 KAIST 원자력 및 양자공학과 졸업(공박). 2016년~현재 (주)LG전자 CTO/책임연구원.



#### 임춘택(林春澤)

1963년 2월 11일생. 1984년 기술고등고시 합격. 1985년 KIT(국립) 전자공학과 졸업. 1987년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공박). 1989년~1995년 ROTC 장교 국방부/육군 근무. 1995년~2003년 국방과학연구소 선임연구원. 2003년~2007년 청와대 안보실 행정관(국방정책). 2007년~2009년 KAIST 항공우주공학과 전문교수. 2010년~2015년 KIFE 무선전력전달전문위원장. 2009년~현재 KAIST 원자력 및 양자공학과 부교수.