

자계 공진 방식의 무선전력전송 장치를 이용한 교류 전력 직접 인가에 의한 LED 조명기기 효율에 관한 연구

(A Study on the Efficiency of LED Lighting Applied by Direct AC Power Using Magnetic Resonance Wireless Power Transfer System)

박정흠*

(Jeong-Heum Park)

Abstract

In this paper, wireless power transfer system using the magnetic resonance was designed and applied to LED lighting for implementation of wireless lighting. This lighting was made by the converted DC driving type and the direct AC driving type. In the former, transferred AC power was rectified into DC and regulated to the specified voltage value, which leads to produce the loss at the rectifying and regulating circuit. In the latter, wireless-transferred AC power was directly applied to LED, which get rid of the loss derived from the additional circuit. For the efficiency-comparison between the former and the latter, the power at each stage was measured when the same optical output radiated from LED lighting part. The result revealed that the direct AC driving type had 18% higher efficiency than the DC driving type and confirmed that LED lighting using magnetic resonance wireless power transfer system can be efficient by direct AC power supply. And the direct AC driving type had the simple circuit structure and the simple LED lighting formation, so this can leads to various application.

Key Words : Magnetic Resonance, Wireless Power Transfer, LED Lighting, Direct AC Power Drive

1. 서 론

최근 들어 모바일기기, 전기자동차 분야 등에서 편리한 충전이 가능한 무선충전의 필요성이 강하게 요구되면서 자계 공진을 이용한 무선전력전송에 관심이 모아지고 있다. 2007년 MIT의 Marin Soljačić 교수 팀이 자기 공진기(Self Resonator)를 이용하여 2m 거리에서 40% 전달효율을 가지는 자계 공진 방식을 제안한 이후[1], 이 방식에 대한 많은 연구가 있어 왔다.

* 주저자 : 김포대학교 IT학부 부교수
* Main author : Associate professor, IT Department,
Kimpo College
Tel : 031-999-4688, Fax : 031-999-4775
E-mail : jhpark@kimpo.ac.kr
접수일자 : 2013년 6월 6일
1차심사 : 2013년 6월 13일, 2차심사 : 2013년 8월 12일
심사완료 : 2013년 8월 20일

그림 1에 제안된 자계 공진 방식의 개요를 나타내었다. 소스코일로 공급된 시변전류는 유도결합에 의해 송신코일(s)에 유도전류를 생성하고 이 코일이 근방의 같은 구조의 코일과 자계 공진을 일으켜 수신코일(d)에 전력을 전달하게 된다. 이 방식은 기존의 전자기 유도 방식에 비해 전송거리가 길며, 전력전달효율이 우수하고, 전자파 안전성이 높다. 또한 방사선호 및 방사저항이 작으며, 비자성체에 대해 높은 투과력을 가지고, 방향성이 없는 등의 장점이 있다.

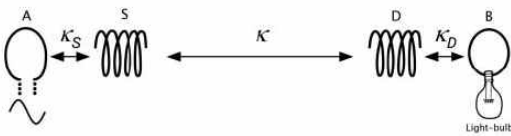


그림 1. MIT가 제안한 자계 공진을 이용한 무선전력전송 장치[1]
Fig. 1. Wireless power transfer system using magnetic resonance proposed by MIT[1]

무선전력전송을 실용화하기 위해서는 전자파인체흡수율(SAR : Specific Absorption Rate)을 고려해야 한다. IEEE 혹은 ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)의 국제기준에 따르면, 1MHz~10GHz 대역에서 전자계 기준이 엄격하다. 이는 이 대역에서의 SAR이 상대적으로 높기 때문이다. 그러나 현재까지는 자계 공진 방식을 이용한 무선전력전송에 대한 많은 연구들이 1MHz~20MHz 대역 근처에 집중된 상황이다[2-4]. 이에 본 연구에서는 전자파 세기의 규제가 작은 100kHz를 중심주파수로 하는 자계 공진 방식의 무선전력전송 장치를 구현하였다.

한편 조명용 고효율 LED(Light Emitting Diode)의 성능이 개선됨에 따라 LED 조명기기 보급이 증가하고 있다. 무선전력 전송장치를 LED 조명기기에 도입하면 전원부와 발광부가 비접촉식으로 분리가 가능하므로 기존에 존재하지 않았던 다양한 응용이 가능하다. 무선전력전송 장치의 수신코일로부터 얻을 수 있는 에너지는 시변 전자계 에너지이므로, 이를 정류하여 직류전압으로 변환한 후 배터리를 충전하여 사용하는 것이 일반적인 방식이다. 이와 같이 하면 그림 2의 (a)처럼 직류 변환 구동 방식의 조명기기를 구성

할 수 있을 것이다. 그러나 이 경우 직류로 변환 시에 정류다이오드와 평활 캐패시터, 배터리 충전 모듈, 배터리 등에서의 손실이 발생하여 전체 시스템의 효율을 저하시키는 요소로 작용할 것이다. 만약 (b)처럼 수신코일로부터의 시변 전자계 에너지로 직접 LED를 구동한다면 손실 유발 요소의 제거로 전체 시스템의 효율을 높일 수 있다.



그림 2. 자계 공진 방식 무선전력전송 장치를 적용한 LED 조명기기의 구성
Fig. 2. Schematic of LED Lighting using Magnetic Resonance Wireless Power Transfer(WPT) System

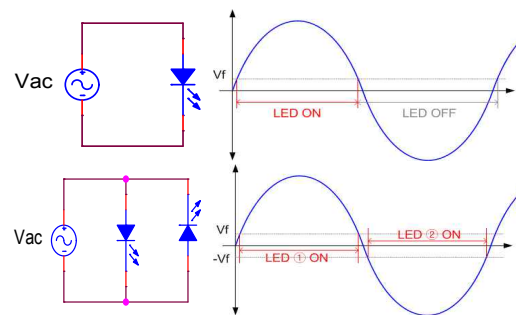


그림 3. 교류 전원 사용 시 LED의 점등 개요
Fig. 3. Concept of LED Lighting using AC Power Source

LED는 교번 전계에서 그림 3처럼 동작할 것이다. 1개의 LED가 교번 전계에 연결된 경우는 저주파수인 경우, 깜박임이 인지될 수 있지만, 성능이 같은 2개의 LED를 역방향으로 근접 배치 연결하여 $-V_f$ 이하에서 점등되도록 하면, 같은 파장의 점등이 교대로 반복되므로, 깜박임 없이 보일 것이다. 또한 빛이 사라져도 망막에 잔광이 남는 것을 이용하여, 빠른 주파수로 점멸을 반복하면 계속 켜져 있는 것으로 인식하는 현상

인 잔광효과에 의해 안정적인 조명기기로 작동할 것이며, 강한 빛(큰 광속)에는 잔광효과가 심화되므로, 100kHz 주파수, 3W 이상의 고출력 LED 사용 시는 이러한 방법으로 교류 전력 직접 구동이 가능할 것이다.

따라서 본 연구에서는 자계 공진 방식으로 전달된 무선 전력을 이용하여, 일반적인 정류 및 충전방식이 아닌 교류 전력 직접 구동 방식으로 LED 발광부를 구동시켜 전체 시스템의 효율을 높이고자 한다. 교류 전력 직접 구동 방식 적용 시의 효율 향상을 검증하기 위해 직류 변환 구동 방식과 교류 직접 구동 방식이 적용된 두 개의 조명 시스템을 제작, 효율 측정 후 비교 평가하였다.

2. 실험 내용

2.1 자계공진방식 무선전력전송 장치 제작

Power MOSFET를 사용한 푸쉬풀 오실레이터를 설계 및 구현하였다. 그림 4에서처럼 Center Tap을 사용한 코일에서 전자기 방사에 의해 송신 코일과 유도성 자계 결합이 되도록 설계하였다. 발진 주파수는 코일 L과 C₂로 조정하여 20kHz~20MHz로 가변 가능하도록 설계하였다. V_{pp}=40V, 20W급의 성능을 가지는 오실레이터를 구현하여 전자계 발생 장치로 사용하였다.

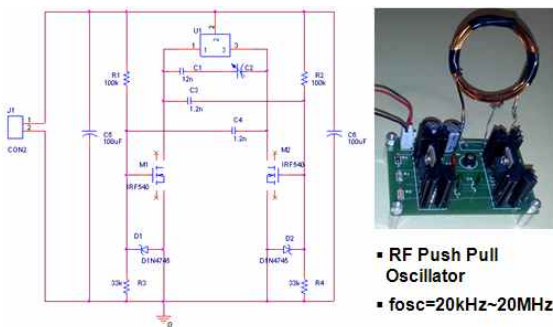


그림 4. 자계 공진 방식 무선전력전송 장치를 위한 전자계 발생 장치 구현
Fig. 4. Implementation of Electro-magnetic Field Generator for WPT System

그림 5에 자계 공진을 이용한 무선전력전송 장치의 구성을 나타냈다. 전자계 발생 장치로부터 100kHz의 정류파를 소스코일로 입력 받아 무선전송을 위한 송

신코일로 유도성 결합을 통해 전달하였다. 각 코일은 반경 0.5mm인 에나멜선을 사용하여, 소스, 송수신 코일 12회, 부하코일은 3회씩 직경 60mm로 감아서 제작하였다. 무선전력전송장치의 해석은 회로적 분석으로 진행하였다[5-6].

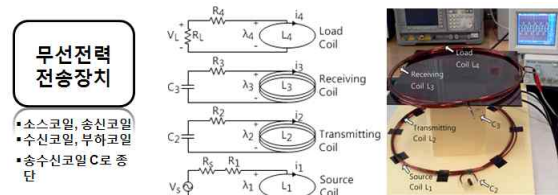


그림 5. 자계 공진 방식 무선전력전송 장치 구현
Fig. 5. Implementation of WPT System

2.2 직류 변환 구동 방식의 무선 조명기기 제작과 효율 분석

그림 6에 정류회로와 DC-UPS(Uninterruptible Power Supply) 모듈을 이용하여 제작한 무선 조명기기를 나타냈다.

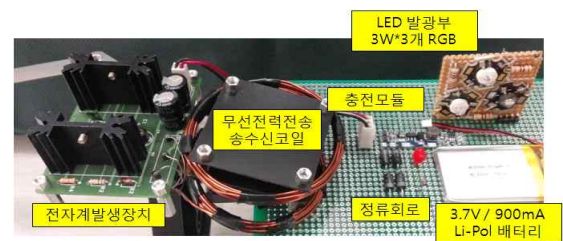


그림 6. 직류 변환 구동 방식을 이용한 무선전력전송 LED 조명기기 테스트 보드
Fig. 6. WPT LED Lighting Test Board using Converted DC Driving Type

정류회로는 그림 7과 같이 다이오드 브릿지를 사용한 전파 정류회로를 적용하였다. 이상적인 브릿지형 전파 정류회로의 효율은 반파 정류회로의 두 배가 되며, 다이오드 및 부하저항에 따라 다르나, 부하저항이 다이오드의 순방향 저항보다 충분히 크다면 최대 효율은 81%로 계산된다. 여기에 평활회로에 의해 리플이 제거됨에 따른 효율향상을 고려하면 최대 96.5%까지 개선 가능하다.

자계 공진 방식의 무선전력전송 장치를 이용한 교류 전력 직접 인가에 의한 LED 조명기기 효율에 관한 연구

그림 8에서는 안정된 출력전압과 배터리 충전을 위해 사용한 Step-Up DC/DC Controller와 Li-ion Charger에서의 효율을 나타냈다. 전자의 경우, 최대 95%의 효율을 보이고, 후자는 자체의 동작 소비 전력이 1.2W수준임을 나타낸다.

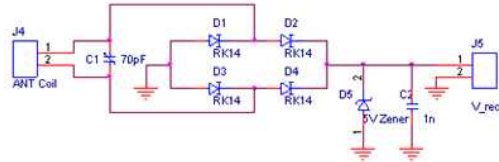


그림 7. 정류회로의 구성 및 효율
Fig. 7. Schematic and Efficiency of Rectifying Circuit

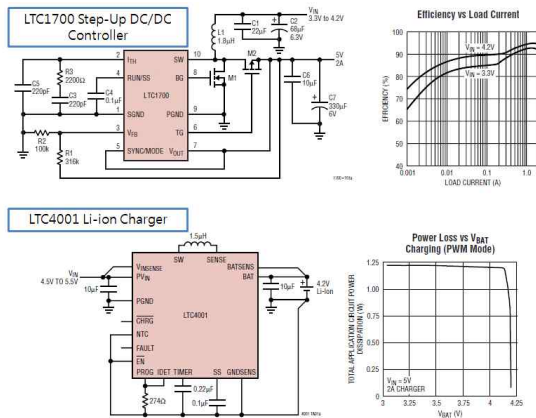


그림 8. 배터리 충전모듈 구성회로 및 각 단계에서의 효율과 손실(7)
Fig. 8. Charging Module Circuit and Efficiency-Loss Graph(7)

상기한 수치를 바탕으로, 정류회로와 충전모듈에서의 손실을 계산하면, 20W 전력 공급 시, 최소 3.2W가 소비되어 전체 16% 손실이 기본적으로 발생하게 된다. 여기에 배터리에서의 전기-화학적 에너지 변환 손실까지 고려한다면 손실은 더욱 커질 것이다. 따라서 정류회로와 충전모듈을 제거하여 교류 전력으로 LED를 직접 구동하면 최소 16%의 손실을 배제할 수 있다. 그러나 이 경우 직류 전원에 비해 교류 전원 인가 시, LED의 발광 효율이 떨어지지 않는지 검토해야 한다.

그림 9에 교류 전력 직접 구동 방식을 적용한 무선 전력전송 LED 조명기기의 구성을 나타내었다. 수신

코일에 유도된 100kHz 주파수의 교류 전력을 직접 LED에 인가함에 의해 정류회로와 DC-UPS모듈을 제거함으로써 효율 향상을 기하였다.

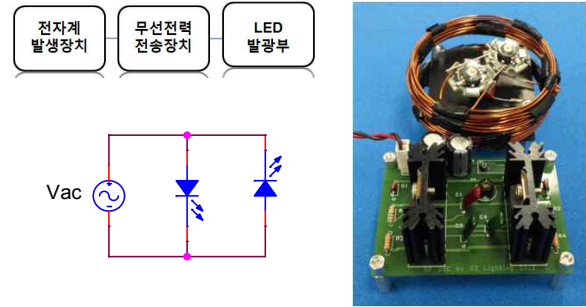


그림 9. 교류 전력 직접 구동 방식을 적용한 무선전력전송 LED 조명기기의 구성
Fig. 9. Implementation of WPT LED Lighting using Direct AC Driving Type

2.3 교류 전력 직접 구동 방식을 이용한 무선 조명기기의 제작과 효율 분석

직류전원인 경우 일정한 광속이 지속적으로 LED로부터 나오는 것에 비해, 교류전원은 2개 LED가 상보적으로 스위칭 하면서 시간에 따라 주기적으로 변화하는 광속이 나온다. 이 때문에 깜박임 현상이 우려되나, 일정 이상의 주파수로 스위칭이 되면 눈의 잔광효과에 의해 일정한 광속으로 인지하게 될 것이다. 따라서 이를 이용하면 더 좋은 발광효율을 얻을 수 있을 것이다. 그러나 여기에서는 이러한 잔광효과는 배제하고 단지 LED로부터 나오는 광속을 측정하여 직류전원과 교류전원의 효율을 비교하고자 한다. 즉 LED로부터 동일한 광속이 나올 때의 직류 전력과 교류 전력을 측정하여 값을 비교하였고, 또한 무선전력공급장치 전체의 공급전력을 측정하여 비교하였다.

광속과 전력을 측정하기 위해 조도계(LX 1330B, SAMPO)와 오실로스코프(TDS2002B, Tektronix)를 이용하여 그림 10과 같이 측정시스템을 구성하였다.

3W Power LED(Green) 2개로 구성된 발광부로부터 100mm 거리에서의 조도를 측정하여 LED로부터 나오는 광량을 비교하였다. 광원으로부터 균일한 범선 방향의 측정면을 구성하기 위해 측정 장치의 내부

를 반사면이 없도록 암면 처리하였다. 표 1에 사용한 LED의 특성을 나타내었다.



그림 10. 전력 및 광속 측정 시스템 구성도
Fig. 10. Implementation of WPT LED Lighting using Direct AC Driving Type

표 1. 발광부에 사용한 LED의 전기적, 광학적 특성
Table 1. Electrical and Optical Characteristic of LED used in Lighting Part

최대 순방향 전류 I_F	최대 펄스 전류 I_{FP}	최대 소비 전력	광속 (@ $I_F=700mA$)	순방향 전압 V_F
750mA	1000mA	3.1W	105lm	3.5V

먼저 직류 변환 구동 방식에서 각 LED의 순방향 전류를 700mA로 제한하기 위해 2Ω의 저항을 직렬로 연결하였고, 교류 직접 구동 방식에서는 별도의 전류 제한 저항을 삽입하지 않았다. 이후 효율 계산에서는 전류 제한 저항에서 소비되는 LED 개당 1W, 총 2W의 전력을 고려하여야 한다.

표 2에서 직류 변환 구동과 같은 조도를 가지도록 전자계 발생 장치의 입력 전압을 조정하고 그 때 각 단에서의 전압과 전류를 측정해서 직류 변환 구동 방

식과 교류 직접 구동 방식의 효율을 비교하였다.

표 2. 같은 조도(12,000Lux)에서의 직류 변환 구동 방식과 교류 직접 구동 방식의 소비 전력 비교
Table 2. Comparison of Power Consumed at Each Stage

각 단에서의 전력 및 효율 항목	측정 항목	직류 변환 구동 방식	교류 직접 구동 방식
전원 측 전력 $P_s[W]=V_s[V] \times I_s[A]$	V_s	15	15
	I_s	1.2	1
	P_s	18	15
입력 측 전력 $P_i[W]=V_i[V] \times I_i[A]$	V_i	3.4	3
	I_i	3.1	3
	P_i	10.5	9
발광부 소비전력 $P_L[W]=V_L[V] \times I_L[A]$	V_L	5.0	2.9
	I_L	1.4	3.0
	P_L	7.0	8.7
효율 [%]	소스:입력 P_i/P_s	58.6	60
	입력:부하 P_L/P_i	66.4	95.7
	소스:부하 P_L/P_s	38.9	57.4

교류 직접 구동 방식의 전체 장치 효율(P_L/P_s)이 57.4%로 직류 변환 구동 방식의 38.9%보다 약 18% 높은 결과를 보였다. 무선전력전송 장치 효율(P_i/P_s)은 두 경우 모두 60%정도로 양호한 값을 보였다. 두 방식의 효율의 차이는 입력 측 전력과 발광부 소비전력 간의 효율(P_L/P_i)에서 큰 차이를 보였다. 교류 직접 구동 방식이 95.7%로 높은 반면, 직류 변환 구동 방식이 66.4%로 낮은 효율을 보였는데, 이에 의해 전체 효율에서 18%의 차이로 나타난 것이다. 이 차이는 직류 구동 방식이 앞에서 언급한 것처럼 20W전력 공급 시 이론적으로 최소 16%의 손실을 수반한다고 했는데, 여기에 약 18% 정도의 부가적인 손실이 추가되어 34%의 손실이 발생했다고 판단된다. 부가적인 손실로는 정류회로 제너다이오드에서 귀환되지 않은 전력손실, Step-Up 컨버터 구성 캐패시터에서의 유전손실, MOSFET에서의 열손실 등을 들 수 있다. 같은 구조의 발광부를 사용했음에도 두 개 방식의 소비전력이 1.7W차이를 보이는 이유는, 교류직접 구동 방식의 경우 그림 3에서 보인 바와 같이 스위칭 시 두 개의 LED가 모두 OFF가 되는 영역이 존재하므로, 조도센서가

검출하는 광량을 직류 구동 방식과 같게 하기 위해서 조금 더 많은 전력을 필요로 하기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 실제 사람이 인지하는 밝기는, 교류 직접 구동방식의 경우 스위칭 시의 잔광효과에 의해 더 적은 전력으로도 직류변환 구동 방식과 같은 밝기를 구현할 수 있을 것이다.

3. 결 론

본 연구에서는 주파수 100kHz 자계 공진 방식을 이용하여 무선전력전송 장치를 구현하였다. 자계 공진 방식은 유도 방식에 비해 긴 전달 거리와 전자파 안정성, 방향성이 없는 등의 장점을 가지므로 다양한 응용이 가능하다. 또한 인체흡수율이 MHz대역보다 상대적으로 낮은 100kHz 주파수를 사용함에 의해 고출력 장치를 상용화에 있어 장점을 가진다.

한편 이러한 무선전력전송 장치를 LED 조명기기에 도입하여 조명기기를 무선화하였다. 전송된 교류 전력을 직류로 정류하고 특정한 전압값으로 조정하여 LED를 구동하는 직류 변환 구동 방식으로 제작하였다. 이 경우 정류회로 및 출력전압 안정화 회로에서의 손실이 발생하게 되므로 무선 전송된 교류 전력을 직접 LED에 인가하여 부가적 회로에 의한 손실을 줄인 교류 직접 구동방식으로도 제작하였다.

직류 변환 구동 방식과 교류 직접 구동 방식의 효율을 비교하기 위해, LED 발광부로부터 동일한 광 출력을 얻을 때의 공급 전력을 측정하여 비교한 결과, 교류 직접 방식이 직류 변환 방식에 비해 약 18% 높은 효율을 보였다. 자계 공진 무선전력전송을 적용한 LED 조명기기는 교류 전력 직접 구동 방식으로 높은 효율을 가지도록 할 수 있음을 확인하였다. 또한 직류 변환 방식에 비해 교류 직접 방식은, 구동 회로의 구성이 간단하고 LED 발광부를 간단히 구성할 수 있으므로 LED를 사용한 응용에 한해서는 다양한 조명기기를 구성하는데 유용할 것이다.

본 연구에서 구현된 100kHz 공진형 무선전력전송 장치는 수중에서도 동작됨을 확인하였으므로, 수족관, 수영장, 선박 등의 조명에서도 활용 가능하다. 이후 연구에서는 무선전력전송의 편의성과 교류 직접 구동

방식의 단순함을 이용한 다양한 응용에 대해 고찰할 필요가 있다.

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학연공동 기술개발사업(No. C0029003)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- [1] Andre Kurs et. al., Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances, Science, Vol. 317, pp. 83-86, 2007.
- [2] K. O'Brien, Inductively coupled radio frequency power transmission system for wireless systems and devices, Aachen, Germany, 2007. ISBN 978-3-83225775-0.
- [3] B L. Cannon, J. F. Hoburg, D. D. Stancil, and S. C. Goldstein, Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.24, No.7, 2009.
- [4] A. Sample, D. Meyer, and J. Smith, Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 58, no. 2, pp. 544 - 554, feb. 2011.
- [5] Jeong-Heum Park, A Study on the Wireless Power Transfer System using Magnetic Resonance at the 1(MHz) Frequency Band, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.26, No.1, pp.75-81, 2012.
- [6] Jeong-Heum Park, Study on the Effect of Resonant Coil Size and Load Resistance on the Transmission Efficiency of Magnetic Resonance Wireless Power Transfer System, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.26, No.7, pp.45-51, 2012.
- [7] Linear Technology, LTC1700, LTC4001 Datasheet.

◇ 저자소개 ◇



박정흠 (朴正欽)

1967년 9월 23일생. 1990년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1992년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992~1994년 삼성전기 종합연구소 연구원. 1998~2000년 삼성전자 반도체연구소 선임연구원. 2003~2004년 영국 Birmingham Univ. EDT Center 방문연구원. 2000년~현재 김포대학교 공학부 부교수.