

자기적으로 결합된 PCB권선을 이용한 무접점 배터리 충전기

노재현, 강용한, 최병조, 안태영*
 경북대학교 전자공학과, *청주대학교 첨단공학부

A New Contactless Battery Charger Using Planner Printed Circuit Board Windings

Jaehyun Nho, Yonghan Kang, Byungcho Choi, Taeyoung Ahn*
 Kyungpook National University, *Chongju University

ABSTRACT

The proposed contactless charger employs a pair of neighboring printed circuit board windings as a contactless energy transfer device, thereby making it amenable to low-profile designs and suitable for applications to the portable telecommunication/computing electronics in which stringent requirements for height, space, and reliability have to be met. The performance of the proposed charger is confirmed with experiments on a prototype charger developed for cellular phones.

1. 서 론

휴대용 정보통신 기기에 사용되는 일반적인 접촉형 충전기의 경우 접촉 불량으로 인한 충전 불량과 배터리 수명단축이 문제점으로 대두되며, 또한 충전기나 통신 기기가 습기와 먼지에 노출되어 있을 경우 시스템의 성능을 저하시킨다. 뿐만 아니라 외부에 노출되어 있는 충전용 금속단자가 사용자의 의복과 접촉될 때 유기 되는 정전기로 인해 통신기기의 오동작이 발생하여 기기의 신뢰성이 저하될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 충전 단자간의 직접적인 전기적 접촉 없이 자기결합을 이용하여 배터리를 충전하는 무접점 충전방식이 활발히 연구되고 있다. 본 논문에서는 PCB 권선을 이용한 무접점 충전방식을 제안한다. 그림 1은 본 논문에서 제안된 무접점 배터리 충전기의 구조이다. Desk-top unit(충전기의 1차측)의 윗면과 배터리팩의 바닥에 부착된 PCB 권선 사이의 자기결합으로 인해 자성체 코어를 사용하지 않고 무접점으로 에너지 전달을 한다. 그림 1(b)는 본 논문에서 사용한 PCB 권선의 구조이다. 이는 일반 자성체 코어를 사용하였을 때 발생하는 물리적 크기

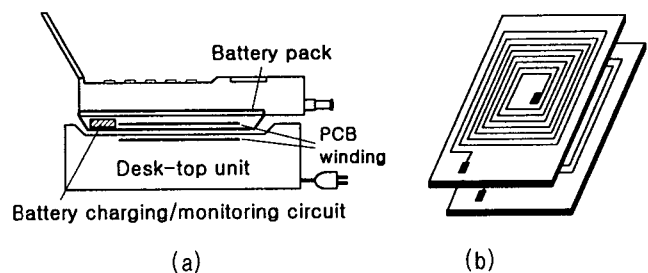


그림 1 제안된 휴대폰용 무접점 충전기와 PCB 권선 구조
 (a) 휴대폰용 무접점 충전기 (b) PCB 권선

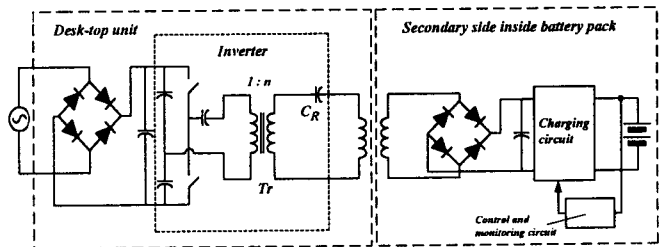


그림 2 무접점 충전기의 개략도

와 모양에서의 제약과 파손이 쉬운 단점 등을 해결할 수 있는 새로운 형태이다.

2. 에너지 전달 회로와 충전 회로

그림 2는 본 논문에서 제안된 무접점 충전기의 개략도이다. Desk-top unit은 1차측 PCB 권선과 고주파 Half-bridge 직렬 공진 인버터(Inverter)로 구성하였다. Half-bridge 직렬 공진 회로는 PCB 권선의 누설 인덕턴스를 공진요소로 이용할 수 있고, 공진 커패시터와의 직렬 공진으로 정현파 형태의 전류, 전압 파형을 PCB 권선에 인가한다. 따라서, Electromagnetic interference(EMI) 문제의 발생 가능성이 낮아진다. 그리고, PCB 권선의 작은 자화 인덕턴스가 상대적으로 큰 순환전류를 PCB 권선의 1차측 회로에 흘려 회로에 큰 전도 손실을 야기할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 PCB 권선의 단점을 보완하기

표 1 PCB 권선의 파라미터

Physical parameters of PCB windings			
Primary winding		Turns of trace	12T
		Thickness of copper trace	75μm
		Distance between traces	0.45mm
		Width of trace	0.96mm
Secondary winding		Turns of trace	10T
		Thickness of copper trace	same as the primary winding
		Distance between traces	same as the primary winding
		Width of trace	same as the primary winding

위해 PCB 권선 앞단에 추가로 강압용 변압기를 사용하여 1차측 PCB 권선에 걸리는 전압을 낮추었다. 충전기 2차측은 PCB 권선의 2차측과 브릿지 정류회로, 충전제어회로를 소형으로 제작하여 리튬 이온(Lithium Ion) 배터리팩 표면에 장착하였다. 본 논문에서 제안된 무접점 충전기는 기존의 충전방식 [6]과 달리 Desk-top unit은 개방 루프로 동작하고 배터리의 충전을 제어, 감시하는 기능은 충전기의 2차측에서 이루어진다. 따라서, Desk-top unit과 충전기의 2차측은 기능적으로 완전히 분리되어 있어 추가적인 정보교환을 할 필요가 없다.

3. 에너지 전달 회로 해석과 설계

3.1 PCB 권선

PCB 권선은 전기적인 접촉 없이 자기적인 결합을 이용하여 에너지를 전달하는 역할을 한다. 권선 모양은 사각형과 원형 구조를 고려 할 수 있는데, 본 논문에서는 배터리의 모양과 같은 사각형 구조를 채택하였다. 무접점 충전기에 사용된 PCB 권선의 파라미터들을 표 1에 나타내었다.

3.2 PCB 권선의 등가회로

그림 3은 PCB 권선의 등가 회로 모델이다. 이 모델은 일반적인 자기 결합된 인덕턴스를 모델링하는 방법을 바탕으로 유도하였다.^[1] 여기서, R_1 , R_2 는 1,2차측 권선 저항, L_k 는 등가 누설 인덕턴스, L_m 은 등가 자화 인덕턴스이다. 그리고 a 는 등가 권선비이다. PCB 권선 사이와 1차측과 2차측 PCB 권선 사이에 기생 커패시터가 존재한다. 그러나, 그 값은 수 pF 정도이고, 고주파수 영역(10MHz 이상)에서만 영향을 준다. 제안된 무접점 충전기의 에너지 전달 회로의 동작 주파수는

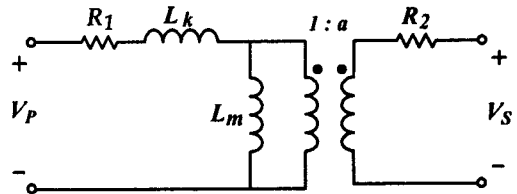


그림 3 PCB 권선의 등가 회로

표 2 제안된 무접점 충전기의 동작특성 및 PCB 권선의 등가회로 파라미터

Desk-top unit	Secondary side
Operating conditions: Input voltage: 85~270 V _{ac} Switching frequency: 850kHz	Control IC: LT 1571-5
Major circuit components: Q ₁ ~ Q ₂ : IRF840 C _R : 20nF	Li-ion battery Dimension: 55mm x 31mm x 5.5mm Voltage: 3.6-4.2V
Circuit model for coupled PCB windings with 2.4mm gap	

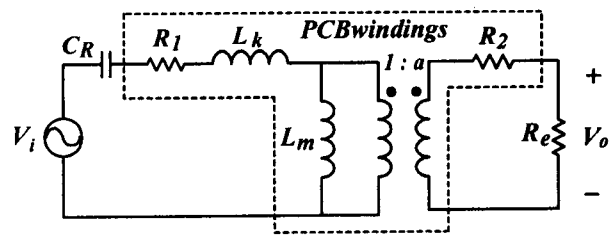


그림 4 에너지 전달 회로의 등가 회로

1MHz 이하이기 때문에 본 논문에서는 기생 커패시터를 무시하였다.^{[2][3]} 제안된 충전기에 관련된 파라미터와 함께 PCB 권선의 등가 파라미터를 표 2에 나타내었다.

3.3 에너지 전달 회로의 등가회로 및 전압 전달 특성

그림 4는 에너지 전달 회로의 등가회로이다. 여기서, C_R 은 직렬공진 커패시터이다. 입력은 강압용 변압기를 통과한 구형파의 기본파 성분만을 고려하였고, 부하는 출력 단의 정류다이오드와 필터 커패시터를 등가 저항 (R_e)로 대신하였다.^[4] 그림 4에서,

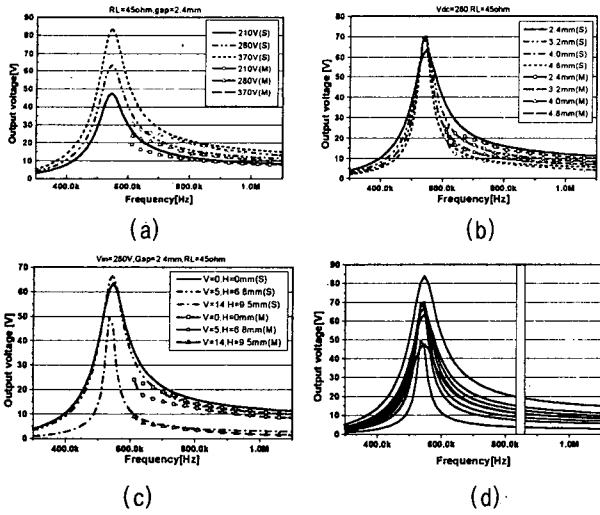


그림 5 전압 전달 특성

$$V_i = \frac{n}{2} \frac{4}{\pi} \frac{V_g}{\pi} \sin(\omega_s t) \quad (1)$$

$$R_e = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (2)$$

이다. 그리고, 에너지 전달 회로의 전압 전달 비는,

$$M = \frac{V_o}{V_g} = \frac{n}{2} \left| \frac{L_k + L_m}{aL_m - \frac{1}{\omega^2 a C_R L_m}} + j \left(\frac{a\omega L_k}{R_e} - \frac{a}{\omega C_R R_e} \right) \right| \quad (3)$$

$$= \frac{n}{2} \left[\left(\frac{L_k + L_m}{aL_m - \frac{1}{\omega^2 a C_R L_m}} \right)^2 + \left(\frac{a\omega L_k}{R_e} - \frac{a}{\omega C_R R_e} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

이다. 여기서

$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_k C_R}} \quad (4)$$

$$Q = \frac{a \sqrt{L_k / C_R}}{R_e} \quad (5)$$

로 정의된다.

그림 5는 식(3)를 이용하여 입력전압 변화, PCB 권선 사이의 간격변화, 그리고 마주 보는 면이 일치하지 않았을 때의 전압 전달 특성을 나타내었다. 그림 5(a)에서 전압 전달비가 최대 되는 점을 중심으로 스위칭 주파수가 증가하면 전압 전달 비가 낮아지고, 입력전압이 증가하면 선형적으로 전압 전달 비가 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 5(b)는 PCB권선 사이의 간격이 커지면 전체적으로 전압 전달 비가 낮아진다. 그리고, 1차측 PCB권선을 기준으로 2차측 PCB권선이 수직, 수평으로 어긋난 길이를 V, H 라 할 때 그림 5(c)에서 마주보는 면이 일치하지 않을수록 결합률이 낮아져 전압전달 비가 낮아진다는 것을 알 수 있다.

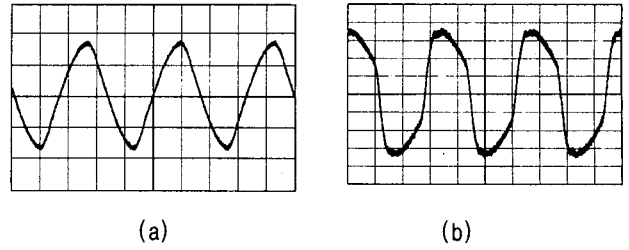


그림 6 1차측 PCB권선의 전류 및 전압 파형
(a) 전류 파형(2A/div, 400ns/div)
(b) 전압 파형 (10V/div, 400ns/div)

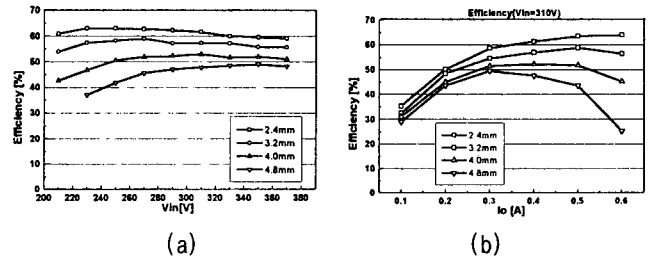


그림 7 에너지 전달 회로의 효율

3.4 에너지 전달 회로 설계

PCB 권선 사이의 간격이 커질수록 또는, 마주보는 면이 일치하지 않을 수록 등가 누설 인덕턴스는 커지고, 등가 자화 인덕턴스는 작아진다. 이로 인하여 결합률이 낮아진다. PCB 권선의 결합률을 높이기 위해선 PCB의 권선수를 늘려 등가 자화 인덕턴스를 크게 하거나, 마주보는 면을 크게 하여야 한다. 그러나 배터리팩에 장착할 수 있는 공간이 제한되므로 PCB 권선 설계 시 이 점을 고려하여야 한다. 본 논문에서 제안된 무접점 충전기의 PCB권선비는 효율을 향상시키고 충전 제어회로의 입력 범위에 들기 위해 12:10으로 디자인하였다. 에너지 전달회로인 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터는 영전압 스위칭(ZVS)이 되도록 하기 위해 스위칭 주파수를 공진 주파수 보다 높은 곳에 위치시킨다.^[4] 본 논문에서는 PCB권선에 직렬공진 커패시터 C_R 을 $20nF$ 으로 하였을 경우, 식(4)에 의해 공진 주파수는 700kHz이다. 따라서 700kHz 보다 높은 주파수에서 동작 시켜야 영전압 스위칭이 실현될 수 있다. 또한, 그림 5(d)을 근거로 본 논문에선 충전 제어 회로의 입력범위와 영전압 스위칭조건을 만족하기 위해 스위칭 주파수를 850kHz로 결정하였다.

3.5 에너지 전달 회로의 실험결과

본 논문에서 제안된 무접점 충전기는 에너지 전달 회로 앞단에 전압 체배기와 브릿지 정류기로 구성된 입력-전압스위치를 사용하였다. 그래서, 에너지 전달 회로의 입력을 입력-전압스위치를 통과한 210-370V로 가정하고 실험하였다.

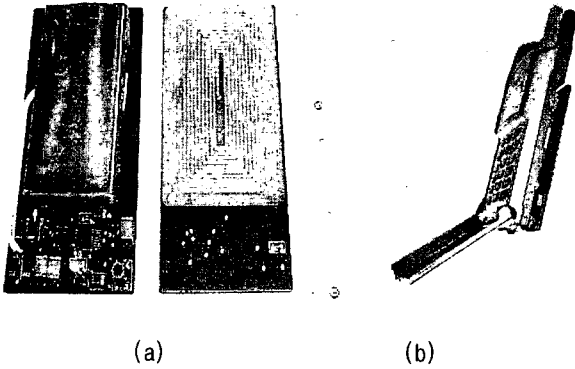


그림 8 제안된 무접점 충전기의 2차측 부분 사진
(a) 충전기의 2차측 부분 (b) 실제 휴대폰에 장착한 사진

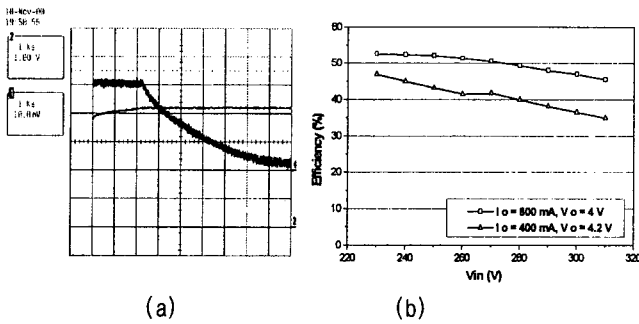


그림 9 제안된 무접점 충전기의 성능
(a) 배터리 충전 파형 (b) 무접점 충전기의 효율

그림 6은 PCB권선 간격 2.4mm에서 입력이 300V, 전류부하가 400mA인 에너지 전달회로에서 PCB 권선 1차측의 전류, 전압 파형이다. 직렬 공진 커패시터와 PCB권선의 인덕턴스에 의해 필터링 되어 PCB권선의 1차측 전류 파형이 완전한 정현파 이고, 전압 파형도 정현파에 가깝다. 따라서, EMI문제의 발생 가능성이 낮다는 것을 알 수 있다. 그리고, 그림 7은 마주보는 면을 일치한 상태에서 PCB권선의 간격을 변화시킬 때의 PCB변압기의 입력 전압 변화에 따른 효율 그래프와 전류 부하 변화에 따른 효율 그래프이다. 그림 7(a)는 400mA 전류 부하에서 입력 전압이 210-370V로 변할 때, PCB권선 간격이 2.4mm인 경우 최대 효율이 64%이지만 PCB권선 간격이 커질수록 자화 전류가 커지기 때문에 효율은 낮아진다. 그림 7(b)는 입력 전압 310V에서 전류부하가 10-600mA로 변화할 때 PCB권선 간격 2.4mm에서 최대 효율은 63%이지만 PCB권선 간격이 커질수록 효율은 낮아진다.

4. 리튬이온 배터리 충전제어회로

리튬 이온 배터리를 충전하기 위해서는 정전압, 정전류 기능을 가져야 한다. 본 논문에서는 LT1571-5를 사용하여 충전제어회로를 구성하였다.^[5] 이 충전 제어회로는 정전류, 정전압 제어기능

이 있고, 8.2V-20V 입력전압범위에서 동작하고, 충전전류는 1.5A까지 가변 되고 충전전압은 4.2V로 고정 되어있다. 그림 8는 본 논문에서 제작한 무접점 충전기의 2차측 부분이다. 여기서 그림 8(a)처럼 리튬이온 배터리와 이를 충전 제어하는 회로를 앞면에 위치시키고, 2차측 PCB권선은 뒷면에 제작하였다. 그림 8(b)는 무접점 충전기의 2차측을 휴대폰에 장착한 전체 모양이다. 그림 9(a)는 제안된 무접점 충전기의 배터리 충전 파형으로 600mA의 정 전류로 급속 충전하다가 4.2V 정전압으로 충전되고 있는 것을 알 수 있다. 그리고, 그림 9(b)에서는 충전 전류를 800mA으로 고정했을 경우 정전류와 정전압 구간에서 이 무접점 배터리 충전기의 전체 효율을 나타내고 있다.

5. 결 론

자기적으로 결합된 PCB권선을 이용하여 무접점 배터리 충전기를 설계 제작하고, 실험으로 성능을 확인하였다. 마주보는 면을 일치시킨 상태에서 PCB권선 간격 2.4mm에서 PCB권선을 포함한 에너지 전달 회로까지의 최대 효율 64%, 충전회로를 포함한 무접점 충전기의 전체효율 53%을 얻었다. 이 초박형 PCB권선을 이용한 무접점 충전 방식은 휴대폰뿐만 아니라 PDA, Palm-top, 인터넷 폰 등 휴대용 정보통신 및 연산기에 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] James W.Nilsson "Electric circuits-Equivalent circuits for magnetically coupled coils " pp. 535-538.
- [2] S.Y.R.Hui, S.C.Tang, and H.Chung, "An accurate circuit model for coreless PCB-based transformers," European Power Electronics Conference, Trondheim, Norway, September, 1997.
- [3] S.Y.R.Hui, H.Chung, and S.C.Tang, "Coreless printed circuit board(PCB) transformers for power MOSFET/IGBT gate drive circuits," IEEE Trans. Power Electron., vol. 14, pp. 431-437, May 1999.
- [4] R. L. Steigerwald, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies," IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 3, No. 2, April, 1988.
- [5] LT1571 Data Sheet. Linear Technology Co., Milpitas, CA,2000.
- [6] C.Kim, D.Seo, J.You, J.Park and B. Cho, Design of a contactless charger for cellular phone, in Proc. IEEE APEC00, Feb. 2000. pp. 769~773.