

# LED 램프를 위한 불연속 모드를 갖는 단일단 PFC 플라이백 파워서플라이의 연구

## Study of Single Stage PFC DCM Flyback Power Supply for a LED Lamp

나 재 두<sup>†</sup>  
(Jae-Du La)

**Abstract** - A light-emitting diode (LED) has been increasingly applied to various industrial fields and general lightings because of its high efficiency, low power consumption, environment-friendly characteristic and long lifetime. To drive the LED lighting, a power converter with the constant output current is needed. Among many power converters, the flyback converter is chosen by many converter designers due to high power density, structural simplicity, and miniaturization. In this converter, an electrolytic capacitor is generally chosen for the stabilization of the DC voltage because of having the large capacitance and the low price. However, the disadvantages are the short expected life time and 120Hz ripple currents on the converter output node. In this paper, a single-stage dimmable PFC DCM flyback converter without the electrolytic capacitor is proposed to prolong the lifetime of the LED driver. For the long lifetime of the converter, the polyester film capacitor with the small capacitance is substituted for the electrolytic capacitor on the output node and an LC resonant filter is added to damp 120Hz ripple current. The proposed converter is verified through the simulation and the experimental works.

**Key Words** : LC resonant filter, Electrolytic capacitor-less, Single-stage flyback converter, LED, Dimmable.

### 1. 서 론

현대의 에너지 소비 절약과 효율적 에너지를 사용하려는 흐름 아래 기존의 조명에 비해 수명이 길고 환경 친화적이며 고효율을 자랑하는 LED 조명에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. LED 조명은 주거용 조명, 신호등, 가로등, 자동차 조명등, 의학 용품 등 다양한 분야에 적용되면서 차세대 조명으로 자리매김하고 있다[1, 2].

LED는 특성상 직류 전류로 구동되어야 하므로 AC 전원을 사용할 경우 AC 전원을 DC로 변환해주는 회로가 필요하다. 이러한 AC-DC 변환 회로로는 스위칭 컨버터가 주로 사용되고 있다. 조명기구에 사용되는 AC-DC 컨버터는 IEC 61000-3-2 규정에 따라 정해진 역률(Power factor, PF)과 전고조파 왜곡률(Total harmonic distortion ratio, THD)을 만족해야 한다. 또한 사용자의 필요 또는 에너지 절약을 위해 적절한 디밍 제어가 필요하다. 디밍 제어 방법에는 아날로그와 PWM 방법이 있다[3-5].

LED 구동 회로로 적용되는 AC-DC 컨버터에는 2단 컨버터와 단일단 컨버터가 있다. 2단 컨버터는 역률 보정 회로와 출력을 제어하는 회로로 구성되어 있으며, 역할에 따라 2단으로 나뉘어 있기 때문에 각각의 회로를 최적화하기 쉽고 출력의 리플이 작으며 큰 용량의 부하에도 적용할 수 있다.

그러나 2단 컨버터는 소자의 개수가 많아지고 각각의 회로를 제어하는 IC가 필요하기 때문에 제어가 복잡해지며 가격이나 크기, 효율 부분에서 단점이 있다. 보통 역률 보정 회로로 부스트 컨버터를 사용하는데, 경계 전도 모드 부스트 컨버터의 경우 낮은 용량의 부하에서 역률과 전고조파 왜곡률이 좋지 않기 때문에 저용량의 LED 부하에 적용하기 힘들다. 반면에 단일단 컨버터의 경우 소자의 개수와 크기를 줄일 수 있고 가격이 낮으며 제어가 간단하고 효율이 좋다. 또한 시스템의 안전을 위해 절연형 컨버터를 많이 사용하며, 절연형 컨버터 중 불연속 전도모드 또는 경계전도모드의 플라이백 컨버터가 제어가 용이하고 소자의 개수가 적어 100[W] 미만의 LED 조명에 많이 적용되고 있다[6-9].

이러한 AC-DC 컨버터는 출력의 안정화를 위해 대용량의 커패시터가 필요하다. 사용되는 대용량의 커패시터는 주로 가격이 저렴하고 용량이 큰 전해커패시터를 사용한다. 그러나 이러한 전해 커패시터를 사용한 AC-DC 컨버터를 LED 조명에 적용할 경우, 전해 커패시터의 수명이 LED의 수명에 비해 매우 짧아 전체적인 시스템의 수명을 단축시키는 문제를 야기한다[10]. 또한 필름 커패시터를 적용할 경우 비용적인 문제가 추가적으로 더 발생할 수도 있으나 전해 커패시터와 필름 커패시터를 비교할 경우 주변온도가 10[°C]가 내려가면 필름 커패시터의 경우 수명이 2배가 된다. 그러나 필름 커패시터의 경우 커패시터의 정격에 비해 실제로 인가되는 전압이 낮을수록 수명이 늘어나며, 보통 커패시터의 정격 전압을 실제 인가되는 전압의 1.5배 정도로 선정하기 때문에 같은 온도에서 전해 커패시터보다 필름 커패시터의 수명은 훨씬 길어진다. LED 조명에 적용된 컨버터의 경우, LED 소자에서의 발열이 크고, 방습·방진 규격을 만족하기

<sup>†</sup> Corresponding Author : Dept. of Electrical Information,  
Inha Technical College, Korea

E-mail : jdna@inhac.ac.kr

접수일자 : 2016년 11월 4일

최종완료 : 2016년 11월 21일

위해 컨버터를 물딩하기 때문에 다른 부하에 적용되는 경우보다 내부의 온도가 높다. LED 부하가 85[°C]에서 구동된다 고 가정하면 하였을 경우, 전해 커패시터는 18,000 시간 이하, 필름 커패시터는 100,000 시간 이상, 세라믹 커패시터는 50,000 시간 이하의 기대 수명을 갖는다. 따라서 LED의 수명과 부합하는 커패시터는 필름 커패시터임을 알 수 있다 [14].

본 논문에서는 단일단 PFC 플라이백 컨버터의 출력단에 사용되는 전해 커패시터를 소용량의 필름 커패시터로 대체하여 전체 시스템의 수명을 연장시키고, 커패시터의 용량이 감소함에 따라 발생하는 120[Hz] 성분의 출력 리플을 LC 공진 필터를 통해 저감하는 회로를 제안하였다. LC 공진 필터는 직렬형을 설계하여 그 성능을 비교하였다. 또한 제안하는 플라이백 컨버터를 불연속 전도모드로 설계하여 별도의 역률 보정 회로 없이 간단한 제어로 역률 보정이 가능하며, 제어의 기준을 가변하는 아날로그 디밍 제어를 적용하여 스위치 하나로 디밍 기능을 구현하였다. 제안한 컨버터는 시차 품 실험을 통해 타당성과 경제성을 검증하였다.

2. 제안하는 단일단 PFC 플라이백 파워서플라이

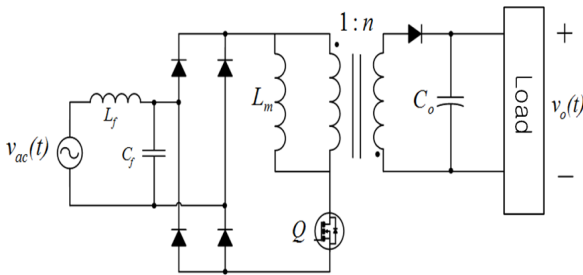


그림 1 제안하는 PFC 플라이백 파워서플라이  
Fig. 1 The proposed The PFC flyback power supply

그림 1은 단일단 플라이백 컨버터의 경우로 별도의 역률 보정의 용이성을 위해 주로 경계 전도모드 또는 불연속 전도모드로 사용된다. 경계 전도모드로 운전하는 경우 불연속 전도모드에 비해 효율이 높지만, 역률과 전고조파 왜곡률이 좋지 않고 출력 부하를 가변하기 어려우며, 가변 주파수로 구동되기 때문에 입력 필터를 설계하기 어렵다는 단점이 있다. 불연속 전도모드의 경우 효율은 조금 낮지만 역률과 전고조파 왜곡률이 좋으며, 출력 부하를 가변하기 용이하여 디

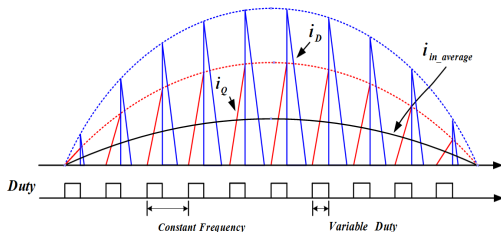


그림 2 불연속 전도모드 플라이백 컨버터의 이론적인 PFC 파형

Fig. 2 Theoretical PFC wave forms of DCM flyback converter

밍에 적용하기에 적합하다[11].

그림 2는 DCM 플라이백 컨버터의 이론적인 PFC 파형이다. 정류기 뒤에 평활 커패시터가 없는 경우 입력 교류 전원이 정류기를 통해 전과 정류된 전압으로 DCM 플라이백 컨버터의 입력에 인가된다. 전과 정류된 전압의 주파수는 스위칭 주파수에 비해 매우 느리므로 한 주기 동안 입력 전압은 고정이라고 볼 수 있다. 한 주기 동안 스위치에 흐르는 전류의 최대치는 입력 전압의 최대치에 비례하게 된다.

$$i_{Q.pk} = \frac{v_{in.pk}}{L}DT_s \tag{1}$$

매 주기가 반복될 때 마다 입력 전압의 크기에 따라 스위치에 흐르는 전류의 최대치가 비례하여 가변되고, 입력 전류의 최대값은 스위치에 흐르는 전류의 평균값과 동일하다.

$$i_{in.pk} = \frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} i_Q(t)dt = \frac{v_{in.pk}}{2L_m}D^2T_s \tag{2}$$

$$i_{in.avg} = \frac{i_{in.pk}}{\sqrt{2}} = \frac{v_{in}(t)D^2T_s}{2L_m} \tag{3}$$

식 (1)에서 (3)에 의해 입력 전류는 입력 전압의 파형과 동일하게 되어 역률 보정이 가능하다[12].

3. 출력전류리플을 저감하는 LC 직렬공진필터

필름 커패시터는 LED 램프의 수명의 측면에서 매우 적당하다. 그러나 필름 커패시터는 전해 커패시터에 비해 용량이 적어 출력단의 안정화에 문제가 발생한다. 특히 입력 주파수의 2배에 해당하는 리플 성분이 크게 나타난다. 이를 해결하기 위해 LC 직렬형 공진 필터를 적용하였다.

필터의 모델링을 위해 LED 부하는 등가회로로 대체하였으며, AC 모델링을 위해 LED 부하는 동작점의 저항 성분으로 대체하였다[13]. 그림 3은 LED 부하의 등가회로 및 AC 모델링에서의 등가회로를 나타낸다.

직렬형 필터를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 AC 모델링 회로를 그림 4에 나타내었다. AC 모델링은 회로의 2차측만 고려하였으며, LED 부하는 동작점에서의 저항 성분으로 등가화 하였다. 각 소자에 존재하는 기생 저항 성분이 120[Hz] 성분의 리플을 감소시키는 데 미치는 영향을 알아보기 위해, 기생 저항 성분을 고려하여 전달함수를 구하였

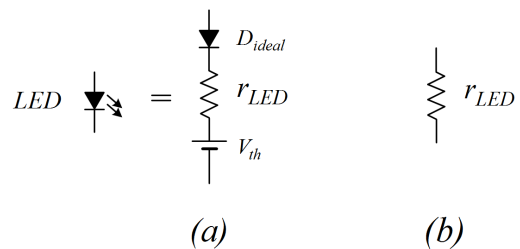


그림 3 (a) LED 등가회로, (b) LED의 AC 모델링  
Fig. 3 (a) The equivalent circuit of LED, (b) AC model of LED

다. 또한 LC 공진 필터를 적용하지 않았을 경우와 비교하기 위해 소용량의 필름 커패시터만 적용한 경우의 전달함수를 도출하고 120[Hz] 성분의 감소 정도를 분석하였다.

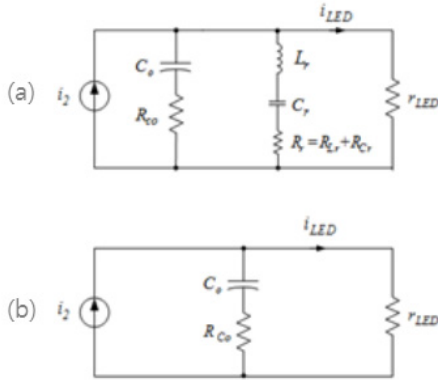


그림 4 제안하는 LC 필터를 적용한 회로의 2차측 AC 모델링 (a) 직렬형 LC 필터의 경우, (b) 필터를 적용하지 않은 경우

Fig. 4 The AC modeling of the proposed LC filter with the parasitic resistance at secondary side (a) with serial LC filter, (b) without LC filter

### 3.1 직렬형 LC 직렬공진필터

앞 절의 병렬형 필터와 같은 방법으로 그림 6-2의 (b)에 나타낸 직렬형 LC 공진 필터를 적용한 회로의 2차측의  $i_2$ 와  $i_{LED}$ 의 전달함수를 기생 저항 성분이 있는 경우와 이상적인 경우로 구하면 식 (4)과 같다.

$$T_{ideal\_parallel} = \frac{s^2 L_r C_r + 1}{s^3 L_r C_r C_o r_{LED} + s^2 L_r C_r + s(C_r + C_o)r_{LED} + 1}$$

$$T_{actual\_parallel} = \frac{a_6 s^3 + a_5 s^2 + a_4 s + 1}{b_6 s^3 + b_5 s^2 + b_4 s + 1} \quad (4)$$

여기서,

$$a_4 = C_r (R_{Cr} + R_{Lr})$$

$$a_5 = C_r \{L_r + R_{Co} C_o (R_{Cr} + R_{Lr})\}$$

$$a_6 = L_r C_r C_o R_{Co}$$

$$b_4 = C_r (R_{Cr} + R_{Lr} + r_{LED}) + C_o (R_{Co} + r_{LED})^2$$

$$b_5 = C_r \{L_r + C_o r_{LED} (R_{Cr} + R_{Lr})\} + C_r C_o R_{Co} (R_{Cr} + R_{Lr} + r_{LED})$$

$$b_6 = L_r C_r C_o (R_{Co} + r_{LED}) \quad (5)$$

식 (4)의 전달함수를 보드선도로 그리면 그림 5와 같다. 이상적인 경우의 보드선도는 120[Hz]에서 -58.1[dB]이고, 저항성분이 1[Ω]인 경우는 -11.6[dB], 2[Ω]인 경우는 -7.65[dB]로, 직렬형 필터의 경우 역시 기생 저항 성분이 필터의 성능에 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

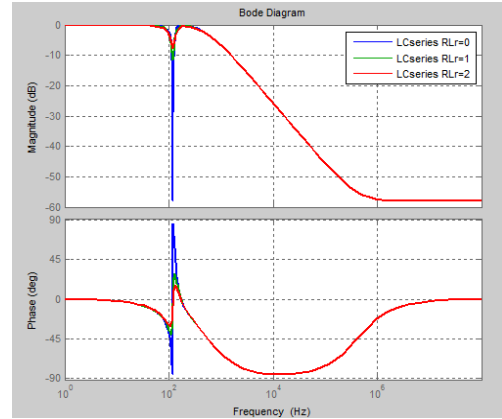


그림 5 직렬형 LC 공진 필터의 기생 저항 성분에 따른 보드선도

Fig. 5 The bode-plot of the AC signal modeling of the proposed serial LC resonant filter with various parasitic resistance.

### 3.2 LC 공진필터를 적용하지 않은 경우

그림 4(b)에 나타낸 LC 공진 필터를 적용하지 않고 소용량의 필름 커패시터만 있는 경우의 회로의 2차 측의  $i_2$ 와  $i_{LED}$ 의 전달함수를 기생 저항 성분이 있는 경우와 이상적인 경우로 구하면 식 (6)과 같다.

$$T_{ideal\_no\_filter} = \frac{s R_{Co} C_o + 1}{s C_o (R_{Co} + r_{LED}) + 1}$$

$$T_{actual\_no\_filter} = \frac{1}{s C_o r_{LED} + 1} \quad (6)$$

식 (5)의 전달함수를 커패시터의 기생 저항 성분 3.5[mΩ]으로 하여 보드선도로 그리면 그림 6과 같다. 이상적인 경우의 보드 선도는 120[Hz]에서 -0.236[dB]이고, 저항 성분이 있는 경우는 -0.236[dB]로 커패시터의 기생 저항 성분은 매우 작아 영향을 거의 미치지 않는 것을 확인할 수 있다. 또

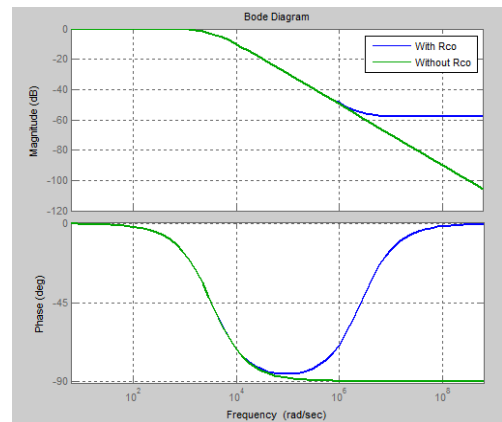


그림 6 LC 공진 필터를 적용하지 않은 경우의 보드선도

Fig. 6 The bode-plot of the AC signal modeling of the circuit without LC resonant filter

한 120[Hz]에서 감소 정도도 LC 공진 필터를 적용한 경우와 비교하여 매우 작은 것을 알 수 있다. 이를 통해 LC 공진 필터를 적용하지 않는 경우 출력단에 120[Hz] 성분의 리플이 매우 크게 나타날 것을 예상할 수 있다.

또한 그림 5는 매우 넓은 입력 전압에서의 제안한 준공진형 플라이백 파워서플라이의 효율곡선으로 최저전압 60[Vac]에서 80[%]의 최저효율을 보이며 최대전압 300[Vac]에서 최대효율 91[%]을 보이고 있다. 표 2는 최대부하에서의 입력 전압변동에 따른 출력, 출력전압 및 효율을 나타내고 있다. 전체 입력 전압 범위에서 평균적으로 약 85[%]의 효율을 나타내며 출력전압도 양호한 결과로써 측정되었다. 그러므로 제안한 5.6[kW] 준공진형 파워서플라이가 매우 넓은 입력 전압범위에서도 양호한 출력특성을 보임을 알 수 있다.

### 3.3 LC 공진필터의 선정

앞 절들의 결과를 통하여 기생 저항 성분이 필터의 성능에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히 LC 공진 필터의 인덕터에 존재하는 기생 저항 성분의 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 따라서 인덕터의 기생 저항 성분을 줄이기 위해 커패시터를 단위 면적 및 체적 당 에너지 밀도가 큰 것으로 선정하여 인덕터의 인덕턴스 값을 줄이고 그에 따라 기생 저항 성분을 최소화하였다.

그림 7은 필름 커패시터의 단위 면적 및 체적에 따른 커패시터의 에너지 밀도를 그래프로 도식화하여 나타낸다. 110[μF]의 경우가 단위 면적 및 체적에 따른 에너지 밀도가 가장 높은 것을 알 수 있다. 이에 따라 필름 커패시터는 110[μF], 인덕터는 16[mH]로 선정하였다.

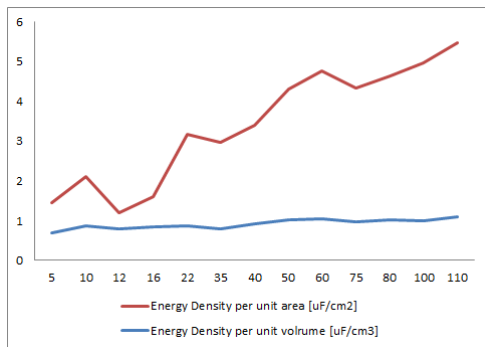


그림 7 단위면적 및 체적에 따른 커패시터의 에너지밀도  
Fig. 7 The capacitor energy density per unit area and volume

### 4. 제안한 플라이백 파워서플라이

그림 8은 제안하는 회로는 60[W]급 단일단 DCM PFC 플라이백 컨버터로 출력 커패시터를 기존의 대용량 전해 커패시터에서 소용량의 필름 커패시터로 대체하여 수명의 신뢰성을 향상시키고, 감소된 커패시터의 용량으로 인해 발생하는 120[Hz] 성분의 리플을 LC 공진 필터를 통해 저감시켜 출력을 안정화시켰다. 직렬형 LC 공진 필터와 필터가 없는 플라이백 파워서플라이를 설계하여 그 성능을 비교하였다. 시스템 파라미터는 표 1에 나타내었다.

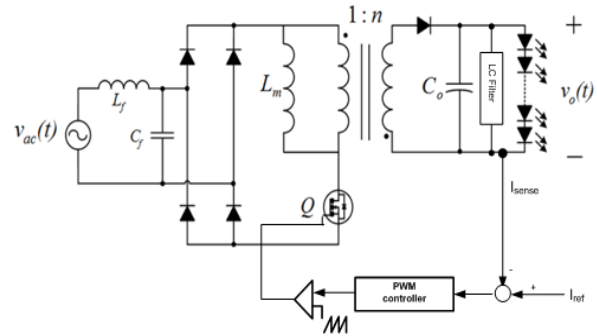


그림 8 제안하는 단일단 DCM PFC 플라이백 컨버터  
Fig. 8 The proposed single-stage DCM PFC flyback converter

표 1 시스템 파라미터

Table 1 System Parameters

Parameter	Symbol	Value
Switching frequency	$f_s$	100 kHz
Input filter inductor	$L_f$	660 uH
Input filter capacitor	$C_f$	100 nF
Magnetizing inductor of transformer	$L_m$	233 uH
Turns ratio of transformer	$n$	0.4
LC resonant filter capacitor	$C_{res}$	47 nF
LC resonant filter inductor	$L_{res}$	47 nF
Parasitic resistor of LC filter inductor	$R_{Lr}$	0.4 ohm
Parasitic resistor of LC filter capacitor	$R_{Cr}$	0.0035 ohm
Output capacitor	$C_o$	470 uF
Parasitic resistor of output capacitor	$R_{Co}$	0.0035 ohm

## 5. 실험결과

제안한 회로의 입력 전압은 220[Vrms]로 상용전원을 사용하였다. 실험은직렬형 필터와 필터가 없는 경우로 나누어 그 결과를 비교하였으며, 역률 보정과 전고조파 왜곡률은 국제 규격인 IEC 61000-3-2 Class C 규제와 비교하여 분석하였다. 또한 디밍 구간 동안의 리플률과 효율을 분석하였으며, 디밍 구간은 사용한 IC 칩의 듀티 최소값과 LED 부하의 최대 전류 한계에 의해 병렬형의 경우 42-100% 가변, 직렬형의 경우 45-100% 가변으로 실험하였다.

### 5.1 LC 공진필터를 적용하지 않은 경우

그림 9는 출력 커패시터를 소용량의 필름 커패시터 110 [μF]를 사용하고 LC 공진 필터를 적용하지 않은 경우의 LED 전류 파형이다. 출력 측에 110[μF]의 소용량의 필름 커패시터만 적용하였기 때문에 출력에 입력 전원의 2배 주파수에 해당하는 120[Hz] 성분의 리플이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 측정된 전류의 평균값은 619[mA], 피크-피크 값은 1.12[A]로, 리플률은 180[%]의 큰 값으로 나타났

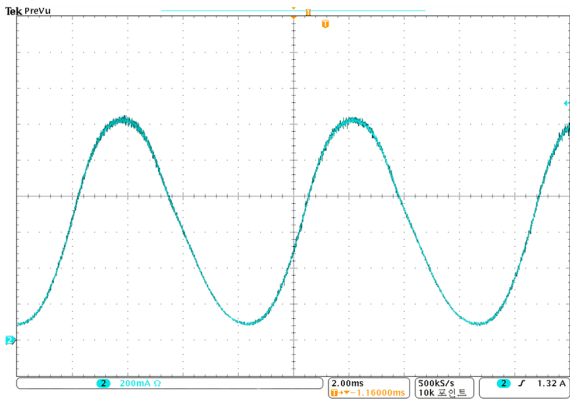


그림 9 LC 공진 필터가 없는 경우 LED 전류  
 Fig. 9 The LED current without LC resonant filter

다. 이 실험에서 LED의 최대 허용 전류 한계에 의해 전부하 조건보다 낮은 동작점에서 실험을 진행하였다.

### 5.2 LC 공진필터를 적용한 경우

그림 10과 그림 11은 전부하에서 직렬형 LC 공진 필터를 적용하였을 경우 입력 전류, 입력 전압, LED 전류에 대한 파형을 나타내고 있다. 역률은 99.6[%]로 역률 보정이 되는 것을 확인하였고, LED 전류의 평균값은 1.1[A], 피크-피크 값은 0.42[A]로 리플률은 38.2[%]를 나타내었다. 측정된 리플률은 앞 장의 전달함수를 통해 예측한 결과와 같이 병렬형에 비해 크게 나타났다.

부하율 50[%]의 경우의 실험 파형은 그림 12과 그림 13에 나타나있다. 측정된 역률은 99[%], LED의 평균 전류는 0.49[A], 피크-피크 값은 0.15[A], 리플률은 30.6[%]로 나타났다. 전부하에 비해 리플률이 조금 낮게 측정되었으나 여전히 높은 수치로, 병렬형에 비해 좋은 출력 특성을 나타내지는 못하고 있다.

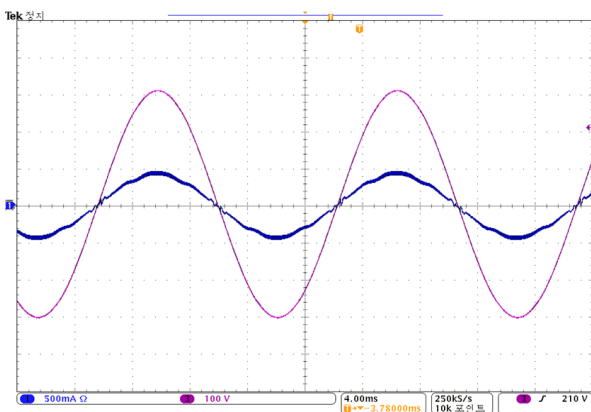


그림 10 직렬형 필터의 경우 전부하에서의 입력 전류, 전압 파형

Fig. 10 The input voltage and input current with serial LC resonant filter under the full load(CH1: input current  $i_{in}$  (500mA/div), CH3 : input voltage  $v_{in}$  (100V/div)

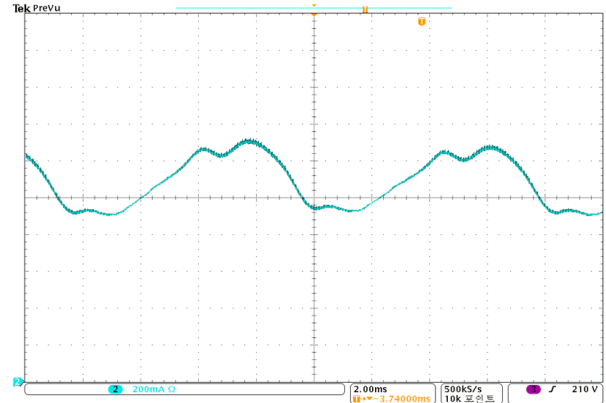


그림 11 직렬형 필터의 경우 전부하에서의 LED 전류  
 Fig. 11 The LED current with serial LC resonant filter under the full load (CH2: LED current  $i_{LED}$  (200mA/div))

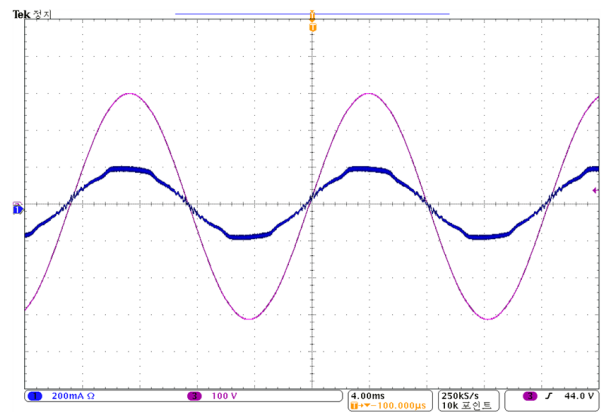


그림 12 직렬형 필터의 경우 부하율 50[%]에서의 입력 전류, 전압 파형

Fig. 12 The input voltage and input current with serial LC resonant filter under the half load(CH1: input current  $i_{in}$  (200mA/div), CH3 : input voltage  $v_{in}$  (100V/div))

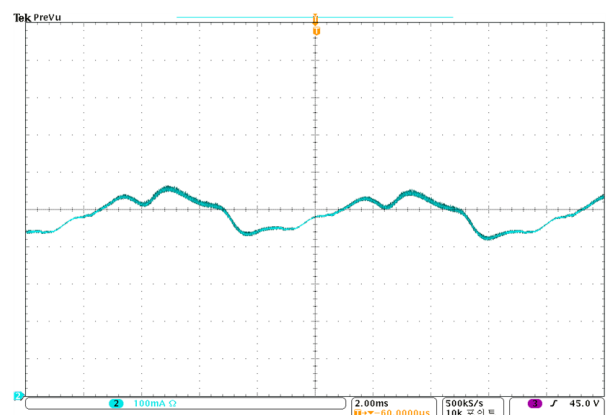


그림 13 직렬형 필터의 경우 부하율 50[%]에서의 LED 전류  
 Fig. 13 The LED current with serial LC resonant filter under the half load (CH2 : LED current  $i_{LED}$  (100mA/div))

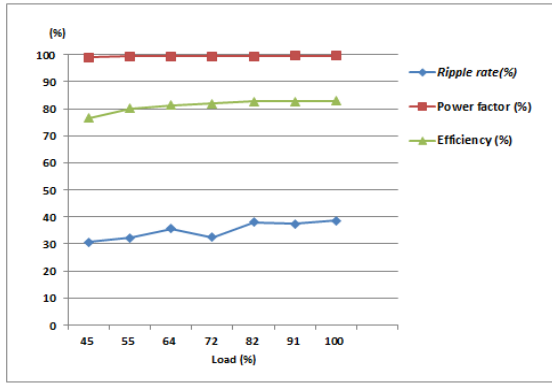


그림 14 직렬형 필터의 경우 부하율에 따른 리플률, 역률, 효율 그래프

Fig. 14 The ripple rate, power factor and efficiency of the serial LC filter as dimming ratio.

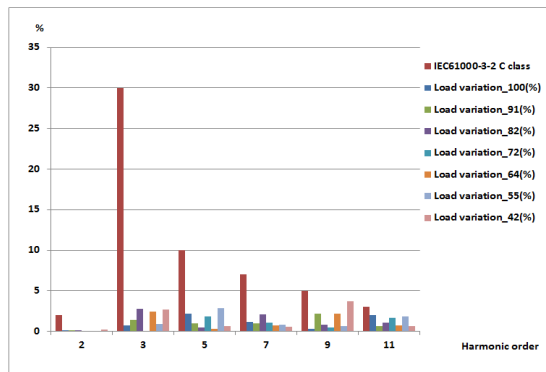


그림 15 직렬형 필터의 경우 부하율에 따른 입력 전류의 고조파 분석 그래프

Fig. 15 The harmonics spectrum of the input current of the serial LC filter as dimming ratio.

직렬형필터를 적용한 경우 부하율에 따른 리플률과 역률, 효율 그래프를 그림 14에 나타나있다. 전체 디밍 범위 내에서 역률은 병렬형과 마찬가지로 모두 99[%]이상으로 역률 보정이 되는 것을 확인하였다. 평균 리플률은 35.1[%]로 필터를 적용하지 않았을 경우에 비해 145[%] 저감되었지만 병렬형에 비해서는 좋은 출력 특성을 나타내지 못함을 알 수 있다. 효율은 평균 81[%]로 전부하에서 82.9[%], 최소 부하에서 76.5[%]으로 병렬형과 비슷한 효율로 측정되었다.

그림 15는 직렬형 필터의 경우 부하율에 따른 전고조파 왜곡률을 IEC 61000-3-2 Class C의 규격과 비교하여 분석한 그래프이다. 전체 디밍 범위 내에서 고조파의 각 성분들이 규격을 만족함을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 UV LED 램프를 위한 불연속모드를 갖는 단일단 PFC 플라이백 파워서플라이를 제안하였다. 또한 기존의 대용량의 전해 커패시터를 소용량의 필름 커패시터로 대체하여 수명을 연장시키고, 직렬형 LC 공진 필터를 적용

하여 안정한 출력을 구현한 단일단 플라이백 컨버터를 제안하였다. 직렬형 LC 필터의 경우 평균 리플률 35[%]로 필터가 없는 경우와 비교하여 145[%] 감소하였다. 또한 별도의 역률 보정회로 없이 불연속 모드로 설계하여 간단한 제어로 역률을 보정하였으며, 99%이상의 역률을 나타내었다. 디밍 제어 또한 아날로그 디밍 제어를 적용하여 별도의 스위치 없이 스위치 하나로 구현하여 경제적이고 실용적인 회로로 설계하였다. 고조파 또한 전체 디밍 범위 내에서 IEC 61000-3-2의 Class C 기준을 모두 만족하였다.

## References

- [1] Y. Zhongming, F. Greenfeld, L. Zhixiang, "A topology study of single-phase offline AC/DC converters for high brightness white LED lighting with power factor pre-regulation and brightness dimmable," Industrial Electronics, 2008. IECON 2008 7. 34th Annual Conference of IEEE, pp. 1961-1967, Nov. 2008.
- [2] X. Xie, J. Wang, C. Zhao, Q. Lu, "A Novel Output Current Estimation and Regulation Circuit for Primary Side Controlled High Power Factor Single-Stage Flyback LED Driver," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 11, pp.4602-4612, Nov. 2012.
- [3] Y. Li, C. Chen, "A Novel Primary-Side Regulation Scheme for Single-Stage High-Power-Factor AC-DC LED Driving Circuit," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 11, pp.4978-4986, Nov. 2013.
- [4] IEC Std. 61000-3-2. Electromagnetic compatibility. Part 3 : Limits. Section 2 : Limits for harmonic current emissions(equipment input current  $\leq 16A$  per phase), 1995.
- [5] H. Ma, J. Lai, Q. Feng, W. Yu, C. Zeng, Z. Zhao, "A Novel Valley-Fill SEPIC-derived Power Supply Without Electrolytic Capacitors for LED Lighting Application", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 6, pp.3057-3071, Jun. 2012.
- [6] Y. Li, C. Chen, "A Novel Single-Stage High-Power-Factor AC-to-DC LED Driving Circuit With Leakage Inductance Energy Recycling," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 2, pp.793-802, Feb. 2012.
- [7] M. SangCheol, K. Gwan-Bon, M. Gun-Woo, "A New Control Method of Interleaved Single-Stage Flyback AC-DC Converter for Outdoor LED Lighting Systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 8, pp.4051-4062, Aug. 2013.
- [8] Y. Hu, L. Hubber, M. M. Jovanović, "Single-Stage, Universal-Input AC/DC LED Driver With Current-Controlled Variable PFC Boost Inductor," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 3,



- pp.1579-1588, Mar. 2012.
- [9] Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, 2nded, Kluwer Academic Publishers, 2001, pp.164-165.
- [10] L. Gu, X. Ruan, M. Xu, K. Yao, "Means of Eliminating Electrolytic Capacitor in AC/DC Power Supplies for LED Lightings," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 5, pp.1399-1408, May. 2009.
- [11] M. SangCheol, K. Gwan-Bon, M. Gun-Woo, "A New Control Method of Interleaved Single-Stage Flyback AC-DC Converter for Outdoor LED Lighting Systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 8, pp.4051-4062, August 2013.
- [12] Huai Wei, Issa Batars, "Comparison of Basic Converter Topologies For Power Factor Correction", IEEE Southeastcon '98. Proceedings, pp.348-353, April 1998.
- [13] J. M. Alonso, J. Viña, D. G. Vaquero, G. Martínez, R. Osorio, "Analysis and Design of the Integrated Double Buck-Boost Converter as a High Power Factor Driver for Power-LED Lamps," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 4, pp. 1689-1697, April 2012.
- [14] Y. X. Qin, Henry S. H. Chung, D. Y. Lin, and S. Y. R. Hui, "Current Source Ballast for High Power Lighting Emitting Diodes without Electrolytic Capacitor", Industrial Electronics (IECON 2008 34thAnnual), pp.1968-1973, November 2008.

## 저 자 소 개



### 나 재 두 (羅 在 斗)

1970년 10월 10일생. 1994년 인천대학교 전기공학과 졸업. 1996년 인하대학교 전기공학과 졸업(석사). 2008년 영국 The University of Birmingham EECE 졸업(공학박), 2008.3.- 현재 인하공업전문대학 전기정보과 부교수  
E-mail : jdna@inhac.ac