

# 새로운 형상의 통합변압기적용 LED PSU

주종성<sup>1</sup>, 이영수<sup>2</sup>, 허예창<sup>1</sup>, 김은수<sup>†</sup>, 황인갑<sup>1</sup>

## LED PSU using an Integrated Transformer of New Shape

Jong-Seong Joo<sup>1</sup>, Young-Soo Lee<sup>2</sup>, Ye-Chang Heo<sup>1</sup>, Eun-Soo Kim<sup>†</sup>, and In-Gab Hwang<sup>1</sup>

### Abstract

In this study, an integrated 2-in-1 transformer for a low-weight and low-cost light-emitting diode lighting power supply is proposed. In the transformer, a power factor correction (PFC) inductor and an LLC resonant transformer are placed and integrated on a single magnetic core. The amount of mutual interference, represented by the coupling coefficient, between magnetic fluxes generated from each magnetic source is minimized by using the new shape core of an integrated 2-in-1 transformer. The design consideration on critical conduction mode PFC converter and LLC resonant converter using the proposed 2-in-1 integrated transformer is described, and the overall performance of the 150 W LED PSU shown through the experiment.

**Key words:** Integrated transformer, High power density, LED lighting power supply, LLC resonant converter, CRM PFC converter

## 1. 서 론

최근 기존 광원과는 달리 고효율, 긴 수명 및 친환경 소자인 LED(Light-Emitting Diode)조명이 시장에서 각광받고 있다<sup>[1]</sup>. LED PSU(Power Supply Unit)는 입력 정류부에 역률개선을 위한 PFC컨버터와 절연 및 효율 개선을 위한 LLC공진컨버터가 널리 사용되고 있다. 그러나 기존 LED PSU의 경우 PFC인덕터와 LLC공진변압기를 개별로 적용하여 LED PSU 단가저감 및 경량화에 한계가 있어, LED PSU의 단가저감 및 경량화에 가장 효과적인 결과를 얻을 수 있는 고집적 자성소자(Integrated Magnetic Component Design) 연구가 검토되고 있다<sup>[2~9]</sup>.

본 논문에서는 LED PSU에 적용된 CRM (Critical Conduction Mode) PFC인덕터와 LLC공진변압기를 하나의 변압기로 통합한 기 발표된 EIE 코어적용 통합변압

기<sup>[10~12]</sup> 보다 낮은 상호커플링계수(Mutual Coupling Coefficient : k)를 가지며, 적용 코어개수를 줄일 수 있는 새로운 형상의 2-in-1 통합변압기를 제안하고, EIE 코어 적용 통합변압기와 제안된 2-in-1 통합변압기의 상호커플링계수(k)를 Maxwell 3D 시뮬레이션과 계측기를 통해 측정 비교하였으며, 통합변압기가 적용된 150W 급 옥외(Outdoor)용 LED PSU를 제작하여 실험을 통해 적용 가능성을 확인하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 제안된 새로운 형상의 통합변압기

기존 150W급 옥외(Outdoor)용 LED조명전원장치의 경우 국제 고조파 규제인 IEC61000-3-2 Class C의 규제를 만족시키기 위해 그림 1과 같이 입력 정류부에 역률개선회로인 PFC컨버터와 절연 및 효율개선을 위하여 영전압스위칭이 가능한 LLC공진컨버터가 사용되고 있다. 그러나 PFC 컨버터와 LLC공진컨버터에 적용되는 인덕터 및 변압기를 위해 개별 자성소자(Magnetic Component)를 사용할 경우 코어의 개수가 인덕터에는 코어 상·하단 2개, 변압기를 위한 코어 상·하단 2개, 총 4개가 적용되고, 보빈의 개수 또한 인덕터와 변압기에 각각 2개가 사용되어 단가저감이나 고집적화에 어려움이 있었다.

Paper number: TKPE-2017-22-1-4

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

<sup>†</sup>Corresponding author: eskim@jj.ac.kr, Electrical & Electronics Engineering, Jeonju University

<sup>1</sup>Electrical & Electronics Engineering, Jeonju University

<sup>2</sup>LG Innotek Components R&D Center

Manuscript received Oct. 7, 2015; revised Nov. 3, 2015; accepted Nov. 24, 2016

— 본 논문은 2015년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

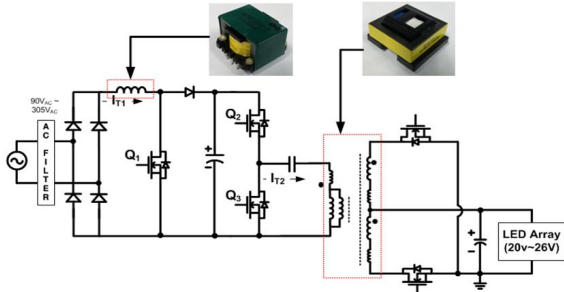
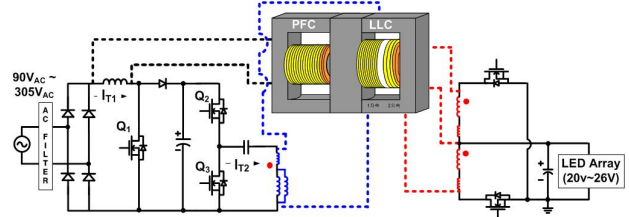


Fig. 1. Conventional LED PSU using the individual PFC inductor and LLC transformer.

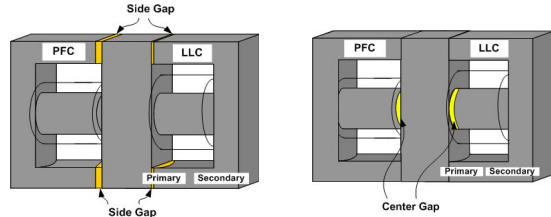
따라서 그림 2(a)와 그림 2(b) 및 그림 2(c)와 같이 개별적으로 사용되던 PFC인덕터와 LLC공진변압기의 코어를 하나로 통합하여 코어와 보빈의 개수를 저감한 기 발표된 EIE 코어는 PFC인덕터에 적용된 “E”형상코어, LLC공진변압기에 적용된 “E”형상코어 그리고 두 개의 자속경로를 위한 “I”형상코어, 총 3개의 코어가 사용되어 기존 개별 자성소자를 사용한 것 보다 1개의 코어 개수만 감소시킬 수 있어 가격저감을 크게 이루지 못하며, PFC인덕터와 LLC공진변압기의 상호자속커플링(Mutual Magnetic Coupling) 영향 때문에 통합변압기 설계가 쉽지 않았다. 이는 그림 2(d)에 나타낸 바와 같이 CRM PFC단은 항상 한쪽방향으로만 전류( $I_{T1}$ )가 흐르기 때문에 자속도 한쪽 방향으로만 쇄교된다. 그러나 LLC단의 자속은 정현파인 공진전류( $I_{T2}$ )가 흐르기 때문에 그림 3과 같이 교번으로 자속방향을 바꾸게 된다.

따라서 그림 3(b)와 같이 자속방향이 서로 동일해질 때, CRM PFC단 일부 자속이 LLC단 2차측 권선에 쇄교되어 LLC단의 1, 2차측 권선전류가 한쪽 방향으로 편향(Bias)되어 이로 인해 상호자속커플링계수( $k=0.0434$ )가 큰 측면자로공극(Side gap)을 적용한 통합변압기의 경우 그림 2(e)에 나타낸바와 같이 LLC 공진전류( $I_{T2}$ )가 발진하는 문제와 출력전류리플과 효율에 영향을 주어 전체 전원시스템을 불안정하게 한다. 이를 해결하기 위한 방법으로 EIE 통합변압기에 적용된 공극적용방식을 그림 2(c)와 그림 2(f)에 나타낸 바와 같이 중간자로(Center gap)에만 공극을 적용하여 상호자속커플링( $k=0.0038$ )을 1/10 이상 감소시켜 이에 따른 간섭영향을 최소화 하였다. 하지만, EIE코어 적용 수평타입의 통합변압기의 경우 조명시장에서 집적화 요구에 따라 높이 제한이 따르기 때문에 통합변압기 각 권선에서 발생하는 축방향의 자속(Magnetic Field)에 의한 Magnetic Interference가 발생할 수 있어 이를 막기 위한 추가적인 알루미늄 차폐시트가 필요하고, 제조단가 및 복잡성 등의 문제가 발생된다.

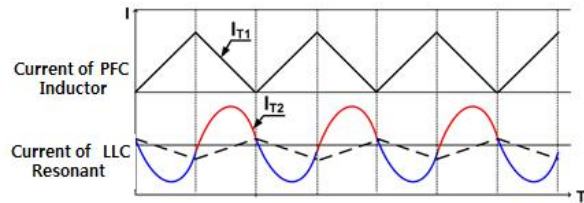
따라서 본 논문에서는 기 발표된 EIE 통합변압기보다 상호자속커플링에 따른 간섭영향을 더 최소화 할 수 있어 적은 상호결합계수( $k=0.0014$ )를 가지며, LLC 공진변압기 또는 CRM PFC인덕터 권선전류에 의해 발생할 수 있는 Magnetic Interference를 차폐할 수 있는 형상구조를 갖는



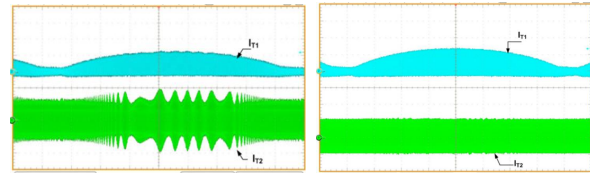
(a) LED PSU with an integrated transformer using EIE core



(b) An integrated transformer with the side gap (c) An integrated transformer with the center gap

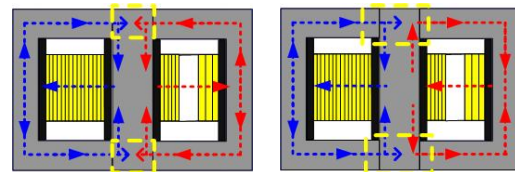


(d) Operation waveforms of PFC inductor current and LLC resonant current



(e) Experimental waveforms of  $I_{T1}$  and  $I_{T2}$  in the integrated transformer with the side gap, (f) with the center gap

Fig. 2. LED PSU using an integrated transformer and its operation waveforms.



(a) Flux cancellation (b) Flux superposition

Fig. 3. Flux flow patterns on the dashed line box.

그림 4와 그림 5 같은 새로운 코어형상을 접목한 통합변압기를 제안하였다.

본 논문에서 제안된 2-in-1 통합변압기는 그림 5(a)와 그림 5(b)에 나타낸 것처럼 PFC단과 LLC단이 평행으로 배치되어 있고, 코어중간자로의 공극( $A_{e1}$ ,  $A_{e2}$ )을 개별적으로 적용하여 하나의 코어 관리만을 통해 각각 총 2개의 코어만 사용하여 통합변압기를 제작할 수 있어 양산에도 용이하다.

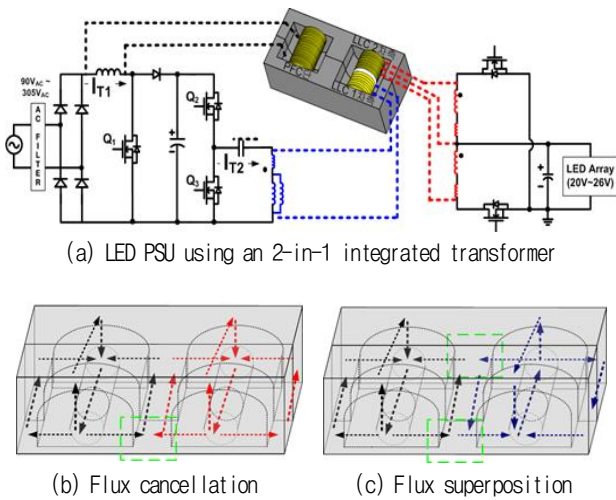


Fig. 4. The proposed the 2-in-1 integrated transformer for LLP PSU.

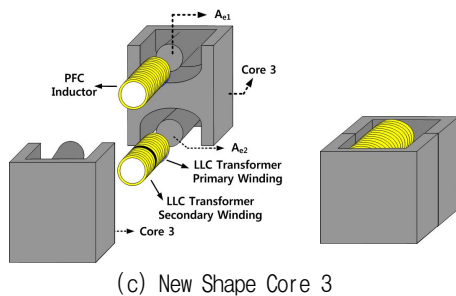
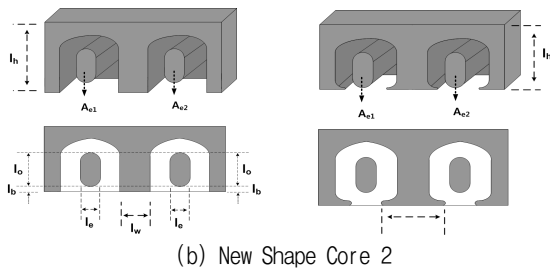
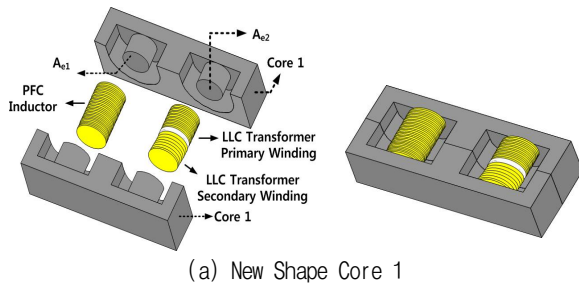
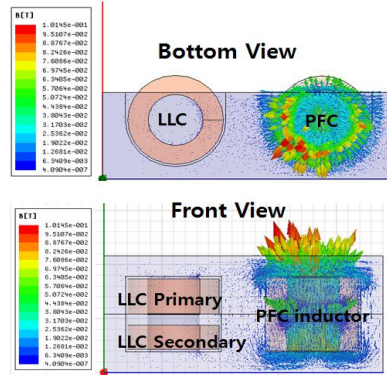
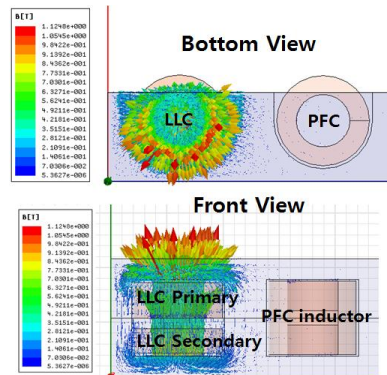


Fig. 5. Core shapes of the proposed 2-in-1 transformer.

따라서 기존 개별 자성소자(Magnetic Component)를 사용한 것 보다 코어 개수를 절반 줄일 수 있다. 또한 제안된 2-in-1 통합변압기에서 발생할 수 있는 PFC 인덕터와 LLC 공진변압기 사이의 상호자속커플링 간섭이 그림 4(b)와 그림 4(c)와 같이 여러 자로경로를 제공하는 코어형상에 의해 우회(Bypass) 될 수 있어 상호자속커플링 간섭영향을



(a) Magnetic flux Influence by PFC inductor current



(b) Magnetic flux Influence by LLC resonant current

Fig. 6. Maxwell 3D simulation results in the 2-in-1 integrated transformer.

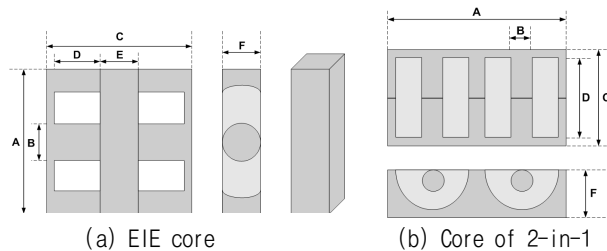


Fig. 7. The core size of the proposed EIE transformer and 2-in-1 transformer.

기 발표된 중간차로공극 EIE 통합변압기보다 1/2 이상 줄일 수 있었다.

사용자의 응용분야에 따라 그림 5(c)와 같은 제안된 코어 형상을 갖는 2-in-1 통합변압기의 사용이 가능하다. 본 논문에 적용된 2-in-1 통합변압기는 그림 5(a)를 적용하여 실험 검토하였다.

## 2.2 제안된 2-in-1 통합변압기 분석 및 Maxwell 3D 시뮬레이션

그림 6은 그림 5(a)에서 제안된 형상의 2-in-1 통합변압기를 Maxwell 3D 시뮬레이션을 통해 PFC인덕터와 LLC공진변압기에서 생성된 자속흐름과 상호자속커플링 관계를 시뮬레이션 수행한 결과이다. 그림 6에서 나타난 화살표의

TABLE I  
MUTUAL COUPLING COEFFICIENT(K) OF THE PFC  
INDUCTOR AND LLC TRANSFORMER IN THE 2-IN-1  
INTEGRATED TRANSFORMER THROUGH  
SIMULATION AND MEASUREMENT

Mutual coupling coefficient(k)/ Core Parameters	EIE Integrated transformer		2-in-1 Integrated transformer	
	Side gap	Center gap		
Maxwell 3D Simulation	0.0361	0.0046	0.0019	
PSM1735(Measured)	0.0434	0.0038	0.0014	
Core Size(PFC/LLC)	A(mm)	34.20	A(mm)	48.00
	B(mm)	10.80	B(mm)	8.75
	C(mm)	45.48	C(mm)	21.40
	D(mm)	12.10	D(mm)	14.30
	E(mm)	10.88	E(mm)	-
	F(mm)	10.80	F(mm)	14.95
Volume (mm <sup>3</sup> )	16,798	Volume (mm <sup>3</sup> )	15,356	
Air-gap(mm, PFC/LLC)	1.82/0.23		1.52/0.16	
PFC Turn-number	42T		51T	
LLC Turn-ratio(N <sub>1</sub> /N <sub>2</sub> )	11(33/3)		12.7(38/3)	

방향과 크기는 자속의 크기와 방향을 나타내며, 그림 6(a)에 나타난 바와 같이 제안된 새로운 형상의 2-in-1 통합변압기의 PFC인덕터에서 생성된 자속이 LLC공진변압기 자로(A<sub>e2</sub>)에 쇄교되지 않고 여러 자로패스경로를 통해 복귀되는 것을 확인하였다. 그림 6(b)는 LLC공진변압기에서 생성된 자속의 흐름을 보여준다. 마찬가지로 LLC공진변압기에서 생성된 자속이 PFC인덕터단으로 거의 쇄교되지 않고 복귀되는 것을 확인할 수 있다.

또한 PFC인덕터와 LLC공진변압기 사이의 상호결합계수(k)를 확인하기 위해 그림 7(a)와 그림 7(b)의 코아형상을 토대로 제작된 변압기에 대해 Maxwell 3D 시뮬레이션과 임피던스 측정기(PSM1735)를 이용하여 측정된 결과 값을 표 1에 나타내었다. 표 1을 보면 제안된 2-in-1 통합변압기가 기 발표된 중간자로-공극(Center gap)만을 사용한 EIE코아 적용 통합변압기보다 절반이상 적은 상호결합계수(k)를 가지는 것을 확인할 수 있었고 이에 따라 PFC단에서 생성된 자속이 LLC단에 끼치는 영향을 EIE형상 통합변압기 보다 최소화할 수 있었고, 제안한 2-in-1 통합변압기의 체적을 기 발표된 EIE형상 통합변압기보다 줄여 단가저감 및 집적화에 적합한 것을 확인할 수 있다.

### 2.3 제안된 통합변압기적용 PSU 동작특성

본 논문에서 제안된 2-in-1 통합변압기에 적용된 PFC컨버터는 CRM(Critical Conduction Mode)으로 동작하며 동작특성은 입력전압(V<sub>in</sub>) 및 부하변화에 따라 동작스위칭주파수가 변하고, 인덕터전류는 Turn-on 시 영에서 상승하여 Turn-off 시 영으로 리셋(Reset)되는 동작특성을 가지며, 입력전압 90V<sub>AC</sub>~305V<sub>AC</sub>, 출력전압440V<sub>DC</sub>, 최소스위칭주파수 62.5kHz, 최대 출력용량 170W 설계사양으로 설계하였다.

식 1과 그림 8은 제안된 2-in-1 통합변압기에 적용한 CRM PFC컨버터의 동작스위칭주파수 특성곡선을 나타낸 것이다.

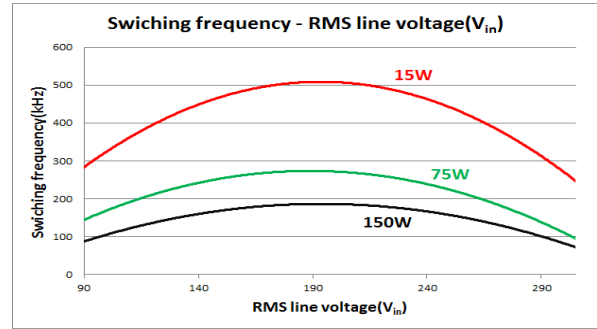


Fig. 8. Operating switching frequency of CRM PFC converter according to the input voltage(V<sub>in</sub>) and load conditions.

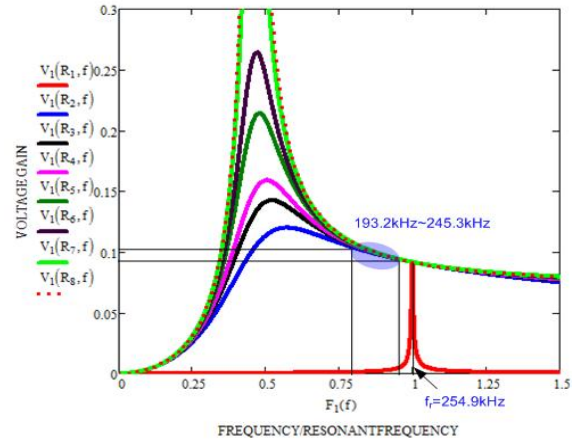


Fig. 9. Gain characteristics in the LLC resonant converter.

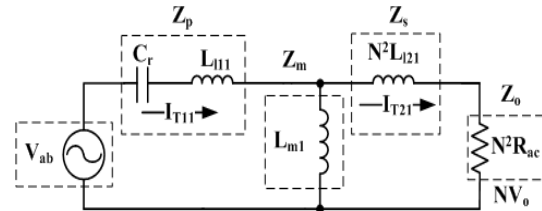


Fig. 10. Equivalent circuit of LLC resonant converter.

$$f = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = \frac{1}{t_{on} + \frac{V_{in}(t) \cdot t_{on}}{V_{out} - V_{in}(t)}} \quad (1)$$

$$= \frac{\eta \cdot V_{in,rms}^2}{2 \cdot L \cdot P_{out}} \cdot \frac{V_{out} - \sqrt{2} \cdot V_{in,rms} |\sin 2\pi f_{line} t|}{V_{out}}$$

CRM PFC컨버터의 입력전압(V<sub>in</sub>) 및 부하 변화 변화에 따른 실제 동작스위칭주파수 범위는 입력전압(V<sub>in</sub>) 90V<sub>ac</sub> 일 때 부하를 10~100%로 변화시켰을 경우 299.0~89.3kHz로 동작하였고, 입력전압(V<sub>in</sub>) 200V<sub>ac</sub>에서는 456.4~193.8kHz, 입력전압(V<sub>in</sub>) 305V<sub>ac</sub>때는 201.7~76.0kHz로 동작하였다. 그리고 LLC공진컨버터의 입력전압은 PFC컨버터의 출력전압인 440V<sub>dc</sub>이고, 출력은 24V<sub>dc</sub>/6.3A 사양에 0~10V 조도조절기능을 갖고 있어 부하변화가 상당히 크다.



TABLE II  
MEASURED VALUES OF TRANSFORMER  
PARAMETERS

LLC resonant converter	Primary inductance	$L_p$	569.6uH
	Primary Leakage/Magnetizing inductance	$L_{l11}/L_{m1}$	46.5uH/523.1uH
	Secondary inductance	$L_s$	3.778uH
	Secondary Leakage inductance	$N^2L_{l21}$	83.0uH
	Equivalent leakage inductance	$L_{eq1}$	118.1uH
	Turn-ratio( $N_1/N_2$ )	$N$	12.7(38/3)
	Air gap	$l_g$	0.16mm
PFC	Resonance frequency	$f_r$	254.9kHz
	Inductance	$L$	147.3uH
	Turn-number	$N$	51T
	Air Gap	$l_g$	1.52mm

TABLE III  
SPECIFICATIONS OF THE LED PSU

LLC resonant converter	Input Voltage	$V_{in}$	440V <sub>dc</sub>
	Output Voltage	$V_{out}$	24V <sub>dc</sub>
	Output Current	$I_{out}$	0.7~6.3A
	Output Power	$P_{out}$	150W
	Resonance Capacitor	$C_r$	3.3nF
PFC	Input Voltage	$V_{in}$	90~305V <sub>ac</sub>
	Output Voltage	$V_{out}$	440V <sub>dc</sub>
	Output Current	$I_{out}$	0.04~0.39A
	Output Power	$P_{out}$	170W

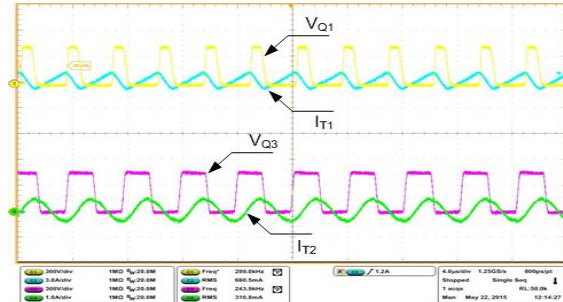
이때 입출력이득 특성 및 전압이득 식은 그림 9와 식 2와 같으며 공진주파수( $f_r$ )는 254.9kHz, 부하 변화에 따른 동작 스위칭주파수 범위는 193.2~245.3kHz이다. LLC공진컨버터의 동작스위칭주파수 범위를 높게 설정한 이유는 CRM PFC컨버터와 동작스위칭주파수가 겹치지 않게 하기 위해서이다. 그러나 높은 입력전압( $V_{in}$ ) 200~305V<sub>ac</sub> 및 경부하 조건에서 CRM PFC컨버터의 동작스위칭주파수가 높아져 LLC공진컨버터의 동작스위칭주파수와 같거나 정수배가 될 수 있지만 이때의 CRM PFC인덕터에 흐르는 전류가 작아 생성되는 기자력도 작기 때문에 LLC공진변압기의 자로에 자속커플링 간섭영향이 최소화되어 정상동작을 하는데 문제가 되지 않는다.

$$G_V = \frac{V_o}{V_{ab}}$$

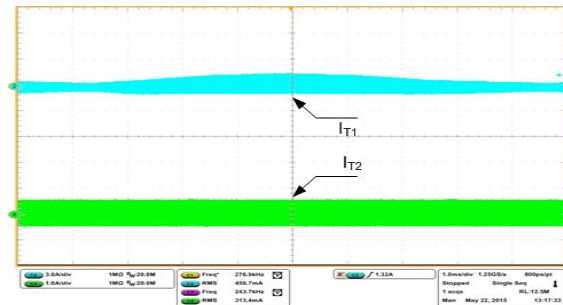
$$= \frac{1}{N} \left| \frac{1}{1 + A - \left(\frac{1}{f_n}\right)^2 \cdot \left(A + \frac{B}{B+1}\right) + jQ \left(\frac{1}{N^2} + \frac{B}{N^2}\right) \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)} \right|$$

$$A = \frac{L_{l11}}{L_{m1}}, B = \frac{N^2 L_{l21}}{L_{m1}}, Q = \frac{2\pi f_r L_{eq}}{N^2 R_{ac}}, f_n = \frac{f_s}{f_r} \quad (2)$$

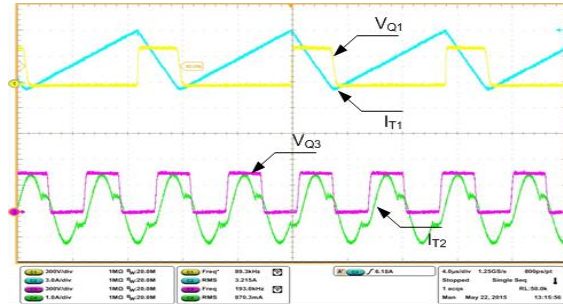
뿐만 아니라 앞서 설명한 바와 같이 제안된 2-in-1 통합 변압기는 CRM PFC 인덕터단과 LLC공진변압기단에서 생성된 자속이 상호자속 커플링 되지 않고 여러 자로경로를 통해 복귀되는 코어형상에 따라 기 연구된 EIE 코어적용 통합변압기보다 상호커플링계수(k)가 낮아 LLC공진변압기의 공진전류( $I_{T2}$ ) DC 편향에 따른 발진문제를 최소화 할 수 있었고, 설계의 어려움을 줄일 수 있었다.



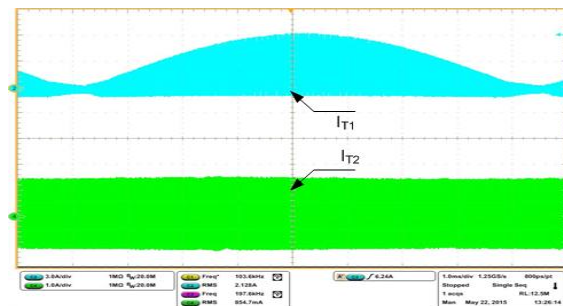
(a) Terminal voltage( $V_{01}$ ,  $V_{03}$ ) and current( $I_{T1}$ ,  $I_{T2}$ ) under  $V_{in}=90V_{AC}$ ,  $V_{out}=24V_{DC}$  and  $P_o=15W$  [4us/div.]



(b) Terminal current( $I_{T1}$ ,  $I_{T2}$ ) under  $V_{in}=90V_{AC}$ ,  $V_{out}=24V_{DC}$  and  $P_o=15W$  [1ms/div.]



(c) Terminal voltage( $V_{01}$ ,  $V_{03}$ ) and current( $I_{T1}$ ,  $I_{T2}$ ) under  $V_{in}=90V_{AC}$ ,  $V_{out}=24V_{DC}$  and  $P_o=150W$ , [4us/div.]

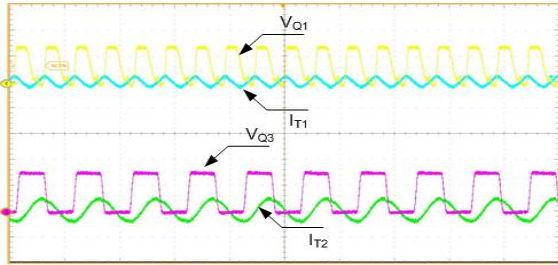


(d) Terminal current( $I_{T1}$ ,  $I_{T2}$ ) under  $V_{in}=90V_{AC}$ ,  $V_{out}=24V_{DC}$  and  $P_o=150W$  [1ms/div.]

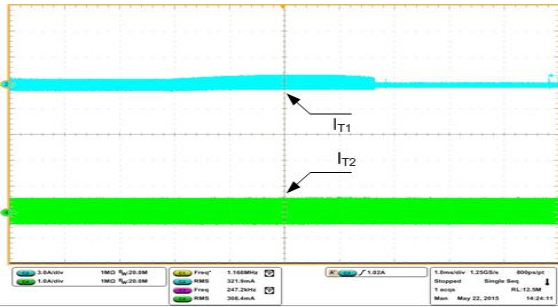
Fig. 11. Experimental waveforms according to the load variation (15W, 150W) when  $V_{in}=90V_{AC}$  and  $V_{out}=24V_{DC}$  (Ch1: 300V/div., Ch2: 3A/div., Ch3: 300V/div., Ch4: 1A/div.)

### 3. 실험 결과

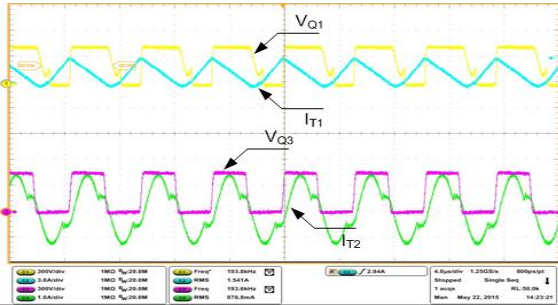
본 논문에서는 150W 정격출력용량을 갖는 옥외



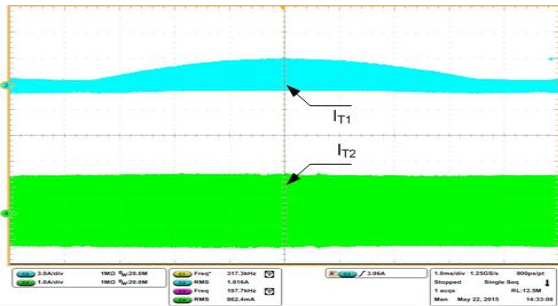
(a) Terminal voltage( $V_{Q1}$ ,  $V_{Q3}$ ) and current( $I_{T1}$ ,  $I_{T2}$ ) under  $V_{in}=200V_{AC}$ ,  $V_{out}=24V_{DC}$  and  $P_o=15W$  [4us/div.]



(b) Terminal current( $I_{T1}$ ,  $I_{T2}$ ) under  $V_{in}=200V_{AC}$ ,  $V_{out}=24V_{DC}$  and  $P_o=15W$  [1ms/div.]

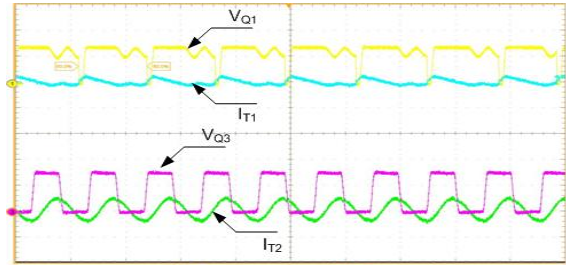


(c) Terminal voltage( $V_{Q1}$ ,  $V_{Q3}$ ) and current( $I_{T1}$ ,  $I_{T2}$ ) under  $V_{in}=200V_{AC}$ ,  $V_{out}=24V_{DC}$  and  $P_o=150W$ , [4us/div.]

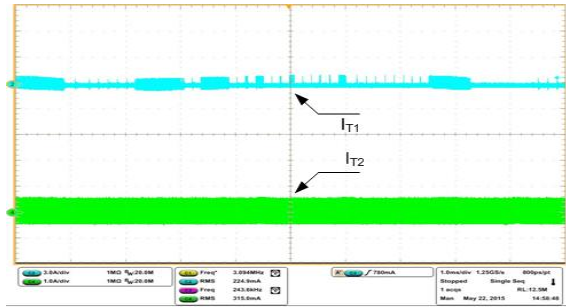


(d) Terminal current( $I_{T1}$ ,  $I_{T2}$ ) under  $V_{in}=200V_{AC}$ ,  $V_{out}=24V_{DC}$  and  $P_o=150W$  [1ms/div.]

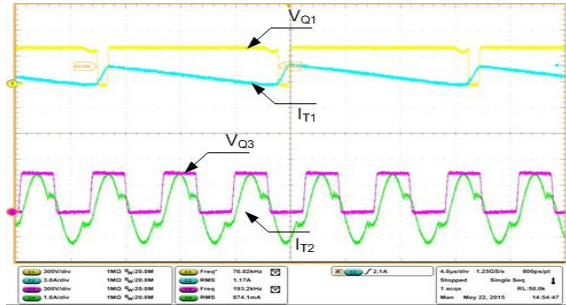
Fig. 12. Experimental waveforms according to the load variation (15W, 150W) when  $V_{in}=200V_{AC}$  and  $V_{out}=24V_{DC}$  (Ch1: 300V/div., Ch2: 3A/div., Ch3: 300V/div., Ch4: 1A/div.)



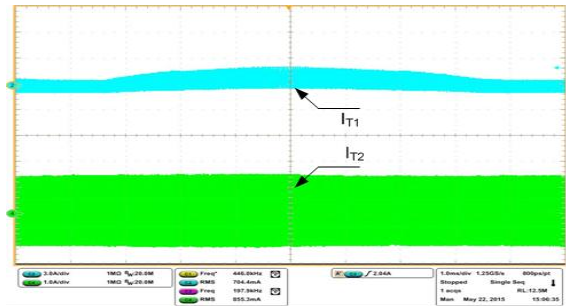
(a) Terminal voltage( $V_{Q1}$ ,  $V_{Q3}$ ) and current( $I_{T1}$ ,  $I_{T2}$ ) under  $V_{in}=305V_{AC}$ ,  $V_{out}=24V_{DC}$  and  $P_o=15W$  [4us/div.]



(b) Terminal current( $I_{T1}$ ,  $I_{T2}$ ) under  $V_{in}=305V_{AC}$ ,  $V_{out}=24V_{DC}$  and  $P_o=15W$  [1ms/div.]



(c) Terminal voltage( $V_{Q1}$ ,  $V_{Q3}$ ) and current( $I_{T1}$ ,  $I_{T2}$ ) under  $V_{in}=305V_{AC}$ ,  $V_{out}=24V_{DC}$  and  $P_o=150W$ , [4us/div.]



(d) Terminal current( $I_{T1}$ ,  $I_{T2}$ ) under  $V_{in}=305V_{AC}$ ,  $V_{out}=24V_{DC}$  and  $P_o=150W$  [1ms/div.]

Fig. 13. Experimental waveforms according to the load variation (15W, 150W) when  $V_{in}=305V_{AC}$  and  $V_{out}=24V_{DC}$  (Ch1: 300V/div., Ch2: 3A/div., Ch3: 300V/div., Ch4: 1A/div.)

(Outdoor)용 LED PSU에 제안된 새로운 형상의 통합변압기를 적용하여 입력전압 90~305Vac 및 10~100% 부하 변화시 CRM PFC컨버터 주 스위칭소자( $Q_1$ )의 전압( $V_{Q1}$ )과

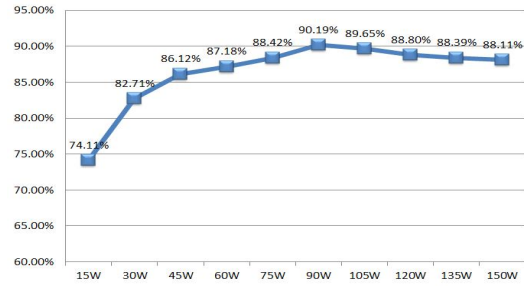
CRM PFC인덕터전류( $I_{T1}$ ) 그리고 LLC공진컨버터의 주 스위칭소자( $Q_3$ ) 전압( $V_{Q3}$ )와 1차측 공진전류( $I_{T2}$ )를 측정하였다.

표 2는 CRM PFC컨버터와 LLC공진컨버터의 파라미터를 나타낸 것이고, 표 3은 LED PSU에 적용된 CRM PFC 컨버터와 LLC공진컨버터의 입출력 사양을 나타낸 것이다.

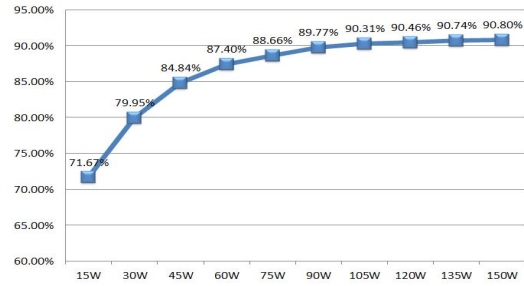
그림 11은 입력전압 90V<sub>ac</sub>일 때 15W, 150W 부하에서 측정된 실험파형으로 이때의 CRM PFC컨버터와 LLC공진컨버터의 동작 스위칭주파수 범위는 CRM PFC컨버터는 89.3~299.0kHz, LLC공진컨버터는 193.0~243.9kHz의 스위칭주파수( $f_s$ ) 제어범위로 동작하였다. 그러나 30W 부하에서 CRM PFC컨버터는 232.0kHz, LLC공진컨버터는 231.1kHz로 거의 같은 스위칭주파수( $f_s$ )에서 동작하였다. 앞서 설명한 바와 같이 CRM PFC컨버터와 LLC공진컨버터의 동작스위칭주파수( $f_s$ )가 같거나 정수배가 되었을 때에 CRM PFC인덕터에서 생성된 자속이 LLC공진변압기 자로에 상호커플링되어 LLC공진변압기의 공진전류( $I_{T2}$ )를 DC바이어스(Bias) 시켜 발진하는 문제가 발생하게 되는데, 제안된 새로운 형상의 통합변압기는 CRM PFC인덕터에서 생성된 자속이 여러 경로를 통해 복귀되어 LLC공진변압기와 상호커플링간섭이 최소화되어 있어 30W일 때 거의 같은 스위칭주파수(232kHz)로 동작하였지만 LLC공진변압기의 공진전류( $I_{T2}$ )가 발진하지 않고 정상 동작하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 이외의 입력전압 120Vac 75W 부하 일 때와 입력전압 200Vac 150W 이 두 경우에도 같은 동작스위칭주파수로 동작하였지만 LLC공진변압기의 공진전류( $I_{T2}$ )가 발진하지 않고 정상 동작하는 것을 확인하였다. 그리고 그림 12는 입력전압 200V<sub>ac</sub> 및 동일 부하조건(15W, 150W)에서 측정된 실험파형이고 PFC컨버터와 LLC공진컨버터의 스위칭주파수( $f_s$ ) 제어범위는 193.8~456.4kHz와 193.6~241.5kHz에서 동작하였다. 그림 13은 입력전압 305V<sub>ac</sub>일 때에 측정된 실험파형이고 PFC컨버터 동작스위칭주파수( $f_s$ )는 76.0~201.7kHz, LLC공진컨버터는 193.2~242.7kHz로 스위칭 동작하였다. 이처럼 CRM PFC컨버터는 입력전압( $V_{in}$ ) 및 부하변화에 따라 동작스위칭주파수( $f_s$ )가 변화였고, LLC공진컨버터의 경우 입력전압( $V_{in}$ )이 CRM PFC컨버터 출력전압( $V_{out}$ )인 440V<sub>dc</sub>로 일정하여 입력교류전압( $V_{in,ac}$ ) 변화에 상관없이 193.0~245.0kHz로 일정한 제어범위로 동작하였고, 모든 입력전압( $V_{in}$ ) 및 부하변화조건에서 CRM PFC인덕터와 LLC공진변압기의 낮은 상호자속커플링( $k=0.0014$ ) 간섭으로 인해 LLC공진변압기의 공진전류( $I_{T2}$ )가 발진하지 않고 정상동작하는것을 확인할수 있었다.

그림 14는 각 입력전압( $V_{in}$ ) 90~305V<sub>ac</sub>일 때 10~100% 부하 변화 시 측정된 효율특성을 나타낸 것으로써 정격부하 150W에서 입력전압( $V_{in}$ )가 증가할수록 PFC인덕터에 흐르는 전류량이 감소함으로 효율이 88.11%에서 91.16%로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

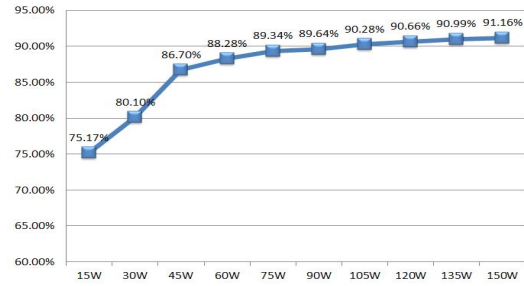
그림 15는 제안된 새로운 형상의 2-in-1통합변압기를 적용한 LED PSU 보드 시제품 사진으로 기존의 개별



(a) Input Voltage 90<sub>ac</sub>



(b) Input Voltage 200V<sub>ac</sub>



(c) Input Voltage 305V<sub>ac</sub>

Fig. 14. Efficiency characteristics according to the input voltage condition.

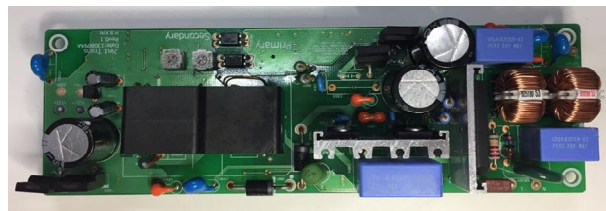


Fig. 15. Prototypes of LED PSU board using the 2-in-1 integrated transformer.

TABLE IV  
COMPARISON OF THE COST AND THE POWER DENSITY ACCORDING TO THE TRANSFORMER TYPES

	Individual PFC Inductor and LLC Transformer	2-in-1 Integrated transformer
Cost	\$1.61	\$1.08
Transformer Power Density	100.7W/inch <sup>3</sup>	159.1W/inch <sup>3</sup>
Core and Bobbin Size	3.35inch <sup>3</sup>	1.109inch <sup>3</sup>

인덕터 및 변압기를 적용한 LED PSU에 사용된 코어의 개수는 4개, 보빈은 2개였다. 그러나 제안된 새로운 형상의 통합변압기를 적용한 LED PSU에는 코어 2개와

보빈 1개가 사용되었다. 표 4는 기존 PFC인덕터와 LLC공진변압기를 각각 적용했을 경우와 제안한 2-in-1 통합변압기에 대해 가격 및 전력밀도를 비교한 것을 나타내었다. 기존 PFC인덕터와 LLC공진변압기가 개별 적용된 제품에 비해 가격적으로 30%이상 단가를 저감할 수 있었고, 변압기 전력밀도는 50%이상 낮출 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 CRM PFC컨버터와 LLC공진컨버터가 개별로 적용된 기존의 LED PSU의 단가저감 및 고 집적화를 위해 CRM PFC컨버터와 LLC공진변압기를 하나의 변압기로 통합한 2-in-1 통합변압기를 제안하였다. 그리고 제안한 새로운 형상의 2-in-1 통합변압기와 기 발표된 EIE 통합변압기를 비교, 분석한 결과 LED PSU의 단가저감 및 고 집적화에 제안한 2-in-1 통합변압기가 더욱 적합하다는 것을 확인할 수 있었고, 제안한 2-in-1 통합변압기의 적용 가능성을 Maxwell 3D 시뮬레이션 및 LED PSU에 적용 후 실험을 통해 검증하였다.

이 논문은 2015학년도 전주대학교의 교비지원에 의해서 수행되었음

#### References

- [1] M. Wend, Andriesse, J. W. Andriesse., "LEDs in real lighting applications: from niche markets to general lighting," *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*, Vol. 5, pp. 2601-2603, Oct. 2006.
- [2] D. S. Shin, Y. J. Jung, S. S. Hong, S. K. Han, B. J. Jang, J. H. Kim, I. O. Lee, and C. W. Roh, "A high efficiency LED driver circuit using LLC resonant converter," *Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 15, No. 1, pp. 35-42, Feb. 2010.
- [3] W. Chen, F. C. Lee, X. Zhou, and P. Xu, "Integrated planar inductor scheme for multi-module interleaved quasi square-wave DC/DC converter," *Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE*, Vol. 2, pp. 759-762, Jun. 1999.
- [4] G. E. Bloom "Multi-chambered planar magnetics design techniques," *IEEE 2000 Power Electronics Specialists Conference Record*, Vol. 1, pp. 295-301, Jun. 2000.
- [5] B. Yang, R. Chen, and F. C. Lee, "Integrated magnetic for LLC resonant converter," *IEEE APEC2002. Seventeenth Annual IEEE*, Vol. 1, pp. 345-351, 2002.
- [6] R. T. Chen and Y. Y. Chen. "Synthesis and design of integrated-magnetic-circuit transformer for VRM application," *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, Vol. 153, No. 3, pp. 369 - 378, May 2006.
- [7] K. J. Hartnett, J. G. Hayes, M. G. Egan, and M. S. Rylko, "Novel CCTT-core split-winding integrated magnetic for high-power DC-DC converters," *Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE), IEEE 2011*, pp. 598-605, Sep. 2011.
- [8] M. Taheri, J. Milimonfared, H. Bayat, and S. H. Fathi, "Analysis, design and implementation of a new zero voltage-switching interleaved asymmetrical half bridge converter using an integrated transformer," *IET Power Electronics*, Vol. 5, No. 9, pp. 1912-1922, 2012.
- [9] K. M Cho, Y. D Kim, I. H Cho, and G. W Moon, "Transformer integrated with additional resonant inductor for phase-shift full-bridge converter with primary clamping diodes," *IEEE Trans. Power Electronics.*, Vol. 27, No. 5, pp. 2405-2414, May 2012.
- [10] C. H. Kang, Y. J. Noh, J. I. Kwon, and E. S. Kim, "Implementation of a 2-in-1 transformer combined with a PFC inductor and an LLC transformer for PSUs," *Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE*, pp. 3385-3391, Mar. 2014.
- [11] C. H. Kang, J. S. Ju, E. S. Kim, J. S. Won, Y. S. Lee, and D. H. Kim, "An integrated transformer-based LED power supply with wide-output-voltage control," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 20, No. 5, pp. 437-447, Oct. 2015.
- [12] Y. S. Lee, "A study on a novel intergrated transformer for LLC resonant converter and PFC converter," Ph. D. Dissertation, Jeonju University, Feb. 2016.





### **주종성(朱鍾晟)**

1990년 5월 13일생. 2016년 전주대 전기전자공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.



### **이영수(李榮秀)**

1962년 2월 11일생. 1988년 경희대 전자공학과 졸업. 1992년 경희대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2016년 전주대 전기전자정보통신공학과 졸업(공학박). 1992년 필립스코리아 입사. 2008년~현재 LG이노텍 연구위원.



### **허예창(許藝創)**

1992년 2월 23일생. 2016년 전주대 전기전자공학과 졸업. 현재 동 대학원 학·석사연계과정.



### **김은수(金恩洙)**

1964년 3월 26일생. 1986년 중앙대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1989년~2001년 한국전기연구원 전력전자 연구그룹 선임연구원(T/L). 2001년~현재 전주대 전기전자공학과 교수. 당 학회 연구사업 이사.



### **황인갑(黃寅鉞)**

1959년 1월 9일생. 1981년 연세대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 아리조나주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박). 1984년~1986년 삼성전자연구소 주임연구원. 1993년~1995년 한국전자통신연구원 선임연구원. 1995년~현재 전주대 전기전자공학과 교수.