

# 제안된 평면변압기를 이용한 LLC 공진컨버터

이승민<sup>1</sup>, 정봉근<sup>1,2</sup>, 장상호<sup>1</sup>, 김은수<sup>1\*</sup>, 이광호<sup>1,2</sup>, 이재삼<sup>1,2</sup>, 박민수<sup>2</sup>  
 전주대학교<sup>1</sup>, LG이노텍(주)<sup>2</sup>

## LLC Resonant Converter Using Proposed Planar Transformer

S.M Lee<sup>1</sup>, B.G Chung<sup>1,2</sup>, S.H Jang<sup>1</sup>, E.S Kim<sup>1\*</sup>, G.H Lee<sup>1,2</sup>, J.S Lee<sup>1,2</sup>, M.S Park<sup>2</sup>  
 JeonJu University<sup>1</sup>, LG Innotek<sup>2</sup>

### 1. 서론

수년간 디스플레이어 전원에 대한 연구가 활발히 이루어졌으며 이에 따라 높은 효율특성을 가지며 고집적화에 따른 작은 부피를 가지는 전원공급장치를 개발이 가능해짐에 따라 슬림화된 디스플레이어 장치 개발이 가능해졌다. 하지만 최근에 소비자들의 요구에 만족시키기 위해 좀 더 슬림화된 전원공급장치 개발이 요구되며 이에 따라 방열판과 커패시터, 입력단 필터와 인덕터 그리고 변압기의 사이즈를 줄여야 한다.

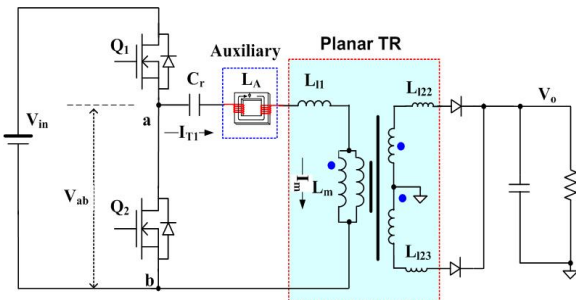
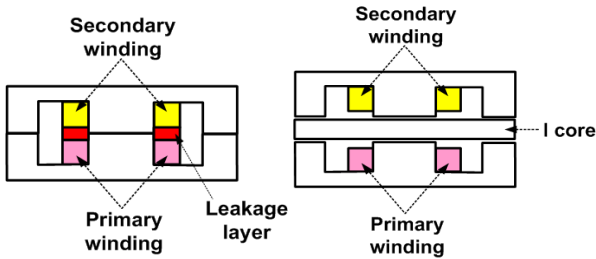


그림 1. 기존 평면변압기를 이용한 LLC 공진컨버터



(a) Leakage layer 적용 (b) 'I'형 코어를 삽입  
 그림 2. 저투자율의 자성체를 삽입한 평면변압기

일반적인 권선형 변압기의 경우 코어 및 보빈 개발에 한계성을 가지기 때문에 사이즈를 줄이는데 어려움을 가지게 된다. 따라서 낮은 높이를 가지는 평면변압기를 적용한 전원공급장치 개발에 대한 연구가 활발히 일어나고 있다. 하지만 기존의 평면변압기를 적용하여 LLC 공진컨버터를 구성하게 되면 평면변압기의 1차측 권선과 2차측 권선 간의 높은 결합계수에 따라 설계자가 원하는 누설인덕턴스를 얻지 못하게 되어 그림1과 같이 1차측에 별도의 직렬 인덕터를 연결하여 설계자가 원하는 공진특성을 얻도록 하였다. 하지만 직렬 공진인덕터를 사용할 경우 별도의 코어 사용에 따라 전체시스템의 부피와 단가가 증가되는 문제점을 가지게 된다.<sup>[1]</sup> 이러한 문제점을 개선하기 위해 그림 2(a)와 같이 자속경로에 누설자속이 증가되도록 Leakage layer를 삽입 하거나 그림 2(b)와 같이 저투자율 'I'형

코어를 삽입하여 누설인덕턴스를 증가시켜 공진특성을 얻도록 하였다.<sup>[2]</sup> 하지만 높은 스위칭주파수에서 동작 시 저투자율 코어에서 많은 열이 발생하게 되며, 전체 변압기 두께가 증가되는 등 슬림화를 위해서는 이러한 변압기의 사용이 제한된 부분이 있다. 따라서 본 논문에서는 새로운 평면 코어 형상을 가지며 누설인덕턴스의 조절과 설계가 가능한 평면변압기를 제안하였으며 새로운 평면변압기를 적용하여 300W급 전원장치에 적용하여 실험하였다.

### 2. 새로운 코어 형상을 갖는 제안된 평면변압기

본 논문에서는 누설인덕턴스의 크기를 조절할 수 있는 새로운 코어 형상을 갖는 평면변압기를 제안하였다. 제안된 평면변압기는 그림 2(a)와 그림 2(b)와 같이 누설자속을 증가시키기 위해 별도의 Leakage layer 또는 저투자율 'I'형 코어를 삽입하지 않고도 설계자가 원하는 누설자속을 증가시킬 수 있으며 그림 1과 같이 별도의 공진인덕터를 적용하지 않고도 설계자가 원하는 공진특성을 얻을 수 있는 장점을 갖는 평면변압기이다.<sup>[3,4]</sup>

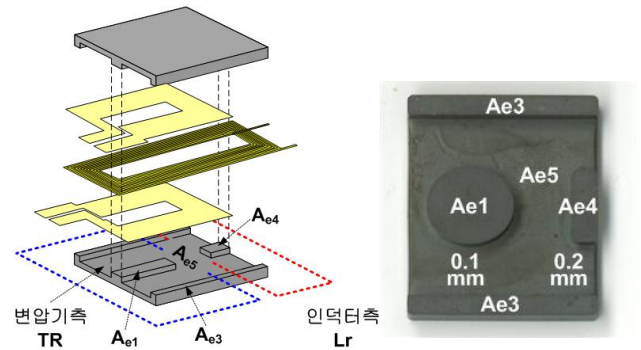


그림 3. 제안된 평면변압기 분해도 및 형상

제안된 평면변압기 코어형상 및 분해도를 그림 3에 나타냈다. 그림 3(a)의 자로 Ae1과 Ae3를 가지는 'E'형 코어로 구성된 1차측 권선과 2차측 권선이 쇠교 되도록 배치되는 변압기단과 자로 Ae4와 Ae3를 가지는 'E'형 코어로 구성된 2차측권선과 1차측권선이 쇠교 되지 않아 누설 인덕턴스를 발생시키는 인덕터단이 서로 결합되어 하나의 평면변압기의 형태를 가지게 된다. 변압기단의 중간자로(Ae1)와 인덕터단의 중간자로(Ae4)는 분리되어 위치해 있고, 변압기단 외각자로(Ae3)와 인덕터단 외각자로(Ae3)는 결합되어있다. 1차측 권선은 변압기단 중간자로(Ae1)와 인덕터단 중간자로(Ae4)를 둘러싸며 배치되고 2차측 권선은 분리된 변압기단 중간자로(Ae1)와 인덕터단 중간자로(Ae4) 사이 공간(Ae5)에 변압기단 중간자로(Ae1)를 둘러싸며 배치된다. 1, 2차 권선방법은 권선간의 근접효과(Proximity

effect)에 따른 손실을 최소화 하기위해 교호방식으로 권선되었  
다. 평면변압기 1차측에서 2차측으로의 전압변환은 변압기단  
중간자로(Ae1)에 감겨있는 1차측 권선과 2차측 권선에 의해 발  
생하게 되며 인덕터단 중간자로(Ae4)에서 발생하는 누설자속에  
의한 누설인덕턴스에 의해 원하는 공진특성을 얻을 수 있게 되  
며 누설인덕턴스의 크기는 인덕터단의 공극변화 또는 중간자로  
(Ae4) 면적의 변화에 따라 조절이 가능한 특징을 가지게 된다.

### 3. 두 대 평면변압기적용 LLC 공진컨버터

본 논문에 적용된 주회로는 1차 직렬, 2차 병렬구조를 가지는  
두 대의 변압기가 적용된 하프 브리지 LLC 공진컨버터이다.  
적용된 주회로에 대한 등가회로는 그림 4와 같다. 1차 직렬, 2  
차 병렬구조를 가지는 LLC 공진컨버터에서 전압이득 특성을  
알기 위해서는 일반적으로 입력전압( $V_{in}$ ) 대 변압기 1의 출력  
전압( $N \cdot V_{out1}$ )의 이득특성과 입력전압( $V_{in}$ ) 대 변압기 2의 출  
력전압( $N \cdot V_{out2}$ )에 대한 2개의 이득특성이 존재하게 되며, 두  
개의 전압이득 특성을 비교 검토하여 변압기를 설계하고 실험  
하였다. 이와 같은 경우 변압기파라메타의 오차 특히 2차측 누  
설인덕턴스의 파라메타 오차에 따른 전압이득 특성이 달라지게  
되어 전압이득 특성 분석시 어려움을 겪게 된다. 또한 그림 4  
에서와 같이 전압이득 특성을 분석하기 위해 부하를 절반의 용  
량에 해당되는 부하를 삽입하여 계산하는 불편함이 발생하게  
된다.<sup>[5]</sup> 따라서 각 변압기의 2차측 누설인덕턴스 오차를 포함하  
는 정확한 전압이득 특성을 얻기 위해서 그림 4의 등가회로를  
전압원이 2개가 존재하며 하나의 부하가 존재하는 그림 5와 같  
은 등가회로로 변환하여 표현하였다. 그림 4의 등가회로를 등  
가회로 5로 나타내기 위해서는 1차측에 위치한 두 개의 자화  
인덕턴스에 인가되는 전압( $V_{Lm1}, V_{Lm2}$ )을 구하도록 하였고, 두 개  
의 자화인덕턴스에 인가된 전압에 따른 부하에 흐르는 전류를  
구하기 위해서 KCL, KVL을 적용하여 부하에 인가되는 전압  
을 구하도록 하였다.

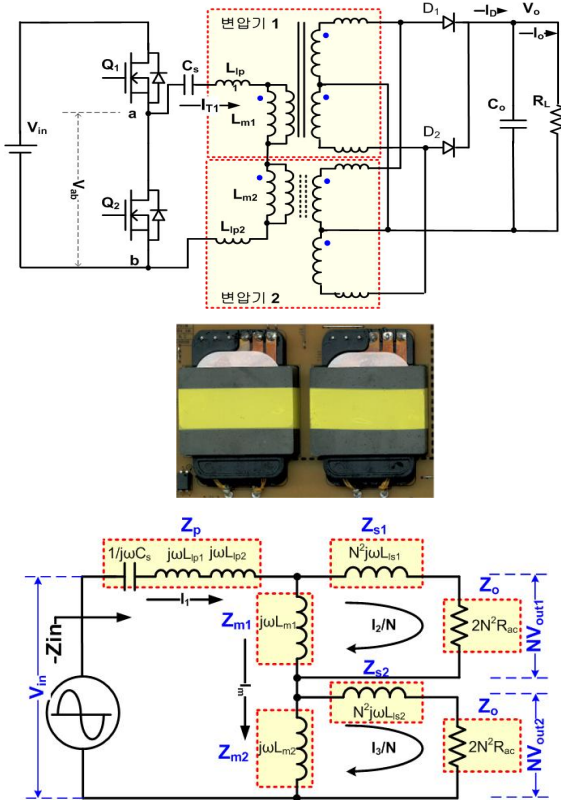


그림 4. 두 대의 변압기가 적용된 LLC 공진컨버터 및 등가회로

$L_{p1}, L_{p2}$  및  $N^2L_{s1}, N^2L_{s2}$  그리고  $L_{m1}, L_{m2}$ 는 공진컨버터의 1차  
측 누설인덕턴스 및 2차측 누설인덕턴스 그리고 자화인덕턴스  
를 나타낸 것이다. 또한  $2 \cdot N^2R_{ac1}$ 과  $2 \cdot N^2R_{ac2}$ 는 그림 4의 부  
하저항, 정류 다이오드 그리고 필터 커패시터를 등가화 하여 1  
차측으로 반영된 절반 용량에 대한 등가 부하저항이다. 식(4)은  
입력전압에 대한 변압기1의 자화인덕턴스에 인가되는 전압의  
전압이득 특성을 나타내는 식이며 식(5)는 입력전압에 대한 변  
압기2의 자화인덕턴스에 인가되는 전압의 전압이득 특성을 나  
타낸 식이다. 식(6)는 1차측에서 바라본 모든 입력 임피던스를  
나타내고 있으며 식(6) 표현시 필요한 각 파라메타의 정의는  
식(7)에 표현하였다. 식(8)은 전압이득 특성 변화에 중요한 요  
소인 1차측 누설인덕턴스와 자화인덕턴스의 비(A)를 나타내는  
식과 2차측 누설인덕턴스와 자화인덕턴스의 비(B)를 나타내는  
식 그리고 부하와 자화인덕턴스의 비(C)를 나타내는 식을 정리  
한 식이다. 식(4)에서 식(8)을 통해 입력전압 대 두 개의 자화  
인덕턴스  $L_{m1}, L_{m2}$ 에 인가되는 전압 비를 식(9)와 식(10)에 의  
해 얻을 수 있게 된다.

$$G_{VLm1} = \frac{V_{m1}}{V_{in}} = \frac{(Z_{o1} + Z_{s1})}{Z_{in} \cdot \left( \frac{Z_{s1} + Z_{o1} + Z_{m1}}{Z_{m1}} \right)} \quad (4)$$

$$G_{VLm2} = \frac{V_{m2}}{V_{in}} = \frac{(Z_{o2} + Z_{s2})}{Z_{in} \cdot \left( \frac{Z_{s2} + Z_{o2} + Z_{m2}}{Z_{m2}} \right)} \quad (5)$$

$$Z_{in} = Z_p + \frac{(Z_{o1} + Z_{s1})Z_{m1}}{(Z_{o1} + Z_{s1} + Z_{m1})} + \frac{(Z_{o2} + Z_{s2})Z_{m2}}{(Z_{o2} + Z_{s2} + Z_{m2})} \quad (6)$$

$$Z_{s1} = N^2 j\omega L_{s1}, \quad Z_{s2} = N^2 j\omega L_{s2}, \quad Z_o = 2N^2 R_{ac}, \quad (7)$$

$$Z_{m1} = j\omega L_{m1}, \quad Z_{m2} = j\omega L_{m2} \quad (7)$$

$$A_1 = \frac{L_{l11}}{L_{m1}}, \quad B_1 = \frac{N^2 L_{l21}}{L_{m1}}, \quad C_1 = \frac{N^2 R_{ac}}{j\omega L_{m1}}, \quad (8)$$

$$A_2 = \frac{L_{l12}}{L_{m2}}, \quad B_2 = \frac{N^2 L_{l22}}{L_{m2}}, \quad C_2 = \frac{N^2 R_{ac}}{j\omega L_{m2}} \quad (8)$$

$$G_{VLm1} = \left| \frac{2N^2 R_{ac} + j\omega L_{l21}}{\left[ \frac{1}{j\omega C_p} + j\omega L_{m1} \left( A_1 + \frac{B_1 + C_1}{1 + B_1 + C_1} \right) + j\omega L_{m1} \left( A_2 + \frac{B_2 + C_2}{1 + B_2 + C_2} \right) \right]} \cdot (B_1 + C_1 + 1) \right| \quad (9)$$

$$G_{VLm2} = \left| \frac{2N^2 R_{ac} + j\omega L_{l22}}{\left[ \frac{1}{j\omega C_p} + j\omega L_{m2} \left( A_2 + \frac{B_2 + C_2}{1 + B_2 + C_2} \right) + j\omega L_{m1} \left( A_1 + \frac{B_1 + C_1}{1 + B_1 + C_1} \right) \right]} \cdot (B_2 + C_2 + 1) \right| \quad (10)$$

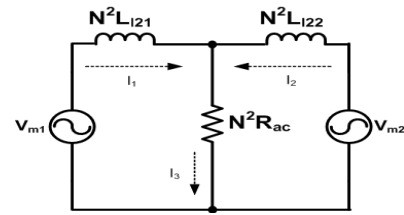


그림 5. KCL, KVL을 적용하기 위한 등가회로

부하에 인가되는 전압을 해석하기 위해 그림 5와 같은 두 개의  
전압원을 가지며 두 개의 전원단으로부터 유입되는 두 개의 전  
류는 하나의 부하에 유입되는 형태를 가지는 등가회로로 나타  
낼 수 있게 된다. 그림 5의 등가회로 회로분석시 KCL, KVL  
법칙을 이용하면 2차측 파라메타 오차 변화에도 정확한 전압이  
득 특성을 얻을 수 있게 된다. 또한 부하 설정 또한 실제 동작  
에 적용되는 부하 파라메타를 적용하여 구할 수 있게 되어 공  
진탱크회로가 1차 직렬, 2차 병렬 구조를 가지는 LLC 공진컨  
버터의 전압이득특성을 분석 할 수 있게 된다. 변압기 T1의 자  
화인덕턴스에 인가되는 전압  $V_{m1}$ 에 대해 변압기 T1의 2차측

누설인덕턴스  $N^2L_{221}$ 에 흐르는 전류  $I_1$ 을 식(11)에 나타내었고 변압기 T2의 자화인덕턴스에 인가되는 전압  $V_{m2}$ 에 대해 변압기 T2의 2차측 누설인덕턴스  $N^2L_{222}$ 에 흐르는 전류  $I_2$ 를 식(12)에 나타내었다. 부하에 흐르는 전류  $I_3$ 는 식(11)과 식(12)의 합으로 식(13)에 나타내었고 최종 출력전압이득은 식(14)을 통해 얻을 수 있게 된다. 그림 4와 그림 5의 등가회로와 식(4)~(13)에 의하여 얻은 최종전압이득 특성식은 식(14)과 같다. 식(14)를 적용하여 Math CAD을 이용한 시뮬레이션결과는 그림 6이다.

$$I_1 = \left| \frac{V_{GLm2} - (N^2j\omega L_{222} + N^2R_{ac})I_2}{N^2R_{ac}} \right| \quad (11)$$

$$I_2 = \left| \frac{V_{GLm1} - \left( \frac{N^2j\omega L_{221}}{N^2R_{ac}} + 1 \right) V_{GLm2}}{N^2R_{ac} - (N^2j\omega L_{222} + N^2R_{ac}) \left( \frac{N^2j\omega L_{21}}{N^2R_{ac}} + 1 \right)} \right| \quad (12)$$

$$I_3 = I_1 + I_2 \quad (13)$$

$$V_o = I_3 N^2 R_{ac} \frac{1}{N} \quad (14)$$

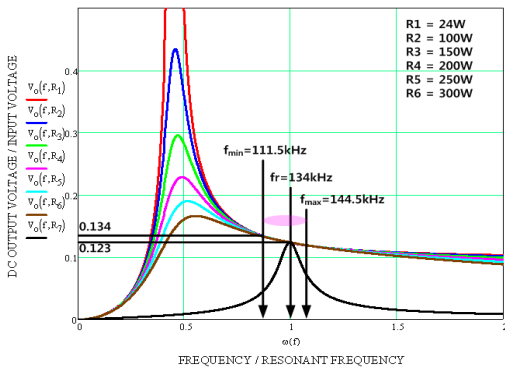


그림 6. 부하 변화에 따른 전압이득 특성

#### 4. 실험결과

본 논문에서는 300W 정격출력용량을 갖는 LLC 공진컨버터에 제안된 평면변압기를 적용하여 입력전압 360Vdc~400Vdc 조건에서 최대정격 출력용량 24V/12.5A에 대해 각각 실험하였다. 실험조건과 주요정격에 대해 표 1에 나타내었다. 그림 7(a)과 그림 7(b)는 그림 3의 제안된 평면변압기의 실험파형으로 입력전압 ( $V_{in}$ ; 360V)에 대하여 출력전압 24V, 출력용량 20W, 300W 일 때 1차측 단자전압 ( $V_{ab}$ )과 전류 ( $I_{T1}$ ) 및 2차측 정류단 전류를 측정된 파형이다. 그림 8(a)과 그림 8(b)는 입력전압 ( $V_{in}$ ; 400Vdc)에 대하여 출력전압 24V, 출력용량 20W, 300W 일 때 1차측 단자전압 ( $V_{ab}$ )과 전류 ( $I_{T1}$ ) 및 2차측 정류단 전류를 측정된 파형이다. 실험결과 그림 6의 전압이득특성 ( $G_V$ )과 비교하여 이득특성 및 동작스위칭주파수범위가 일치하는 것을 확인하였다.

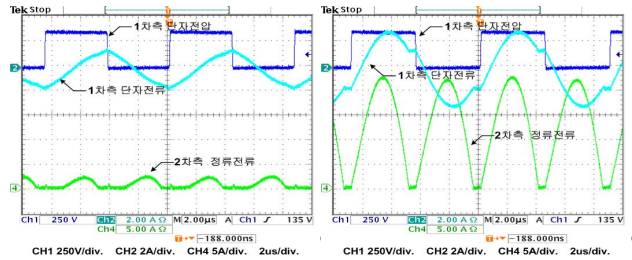
표 1 제안된 평면변압기 주요 정격

입력 전압 ( $V_{in}$ )	360Vdc~400Vdc
출력전압 ( $V_o$ ) 및 전류 ( $I_o$ )	24V/12.5A
출력 용량 ( $P_o$ )	300W
스위칭주파수 ( $f_s$ ) 범위	111kHz~145kHz
공진주파수 ( $f_r$ )	134kHz
공진 커패시터 ( $C_s$ )	24nF
입력/출력 커패시터 ( $C_{in}/C_o$ )	231uF/132uF
스위칭 소자 ( $Q_1, Q_2$ )	SD20N60
출력전류 다이오드	MBRF20100CT
적용된 제어 IC	L6559

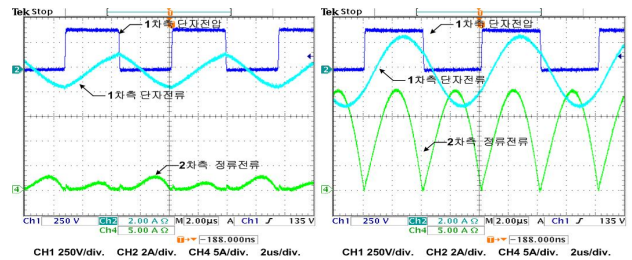
표 2. 제안된 평면변압기 측정 파라미터

1차측 자기인덕턴스	126.6uH/129.5uH
2차측 자기인덕턴스	6.25uH/6.38uH
1차측 누설인덕턴스	16.28uH/16.55uH
자화인덕턴스	100uH/101uH
등가누설인덕턴스	29.26uH/29.51uH
턴수비 ( $N_2/N_1$ )	0.223(2/9)

모든 부하 조건에서 단자전류 ( $I_{T1}$ )는 단자전압 ( $V_{ab}$ )에 대해 항상 지상 전류가 흐르기 때문에 항상 ZVS (Zero Voltage Switching) 동작됨을 확인 할 수 있었다.



(a) 24Vdc/0.8A (b) 24Vdc/12.5A  
그림 7. 입력전압 ( $V_{in}$ ) 360V일 때 실험파형



(a) 24Vdc/0.8A (b) 24Vdc/12.5A  
그림 8. 입력전압 ( $V_{in}$ ) 400V일 때 실험파형

#### 5. 결론

본 논문에서는 제안된 평면변압기를 적용하여 LLC 공진컨버터를 제작 구성하여 실험하였고, 전압이득 특성 수식과 비교하여 수식의 타당성을 검증하였고 실제 적용이 가능함을 보였다.

이 논문은 LG이노텍(주) 산학협력연구과제로 수행된 과제임

#### 참고 문헌

- [1] W.Chen, G. Hua, D. Sable and F.C. Lee, "Design of high efficiency, low profile, low voltage converter with intergrated magnetics", IEEE APEC'97, pp.911 917, 1997
- [2] Ionel Jitaru, "High Power Planar Transformer", Rompower Inc., Patent No : US6,211,767 B1, 2001. 4. 3
- [3] 김은수, "평면변압기", 전주대학교, LG이노텍(주) 공동출원, 특허출원번호 10 2010 0042526, 2010. 5. 6
- [4] 김은수, 정봉근, "평면변압기", 전주대학교, LG이노텍(주) 공동출원, 특허출원번호 10 2010 0052949, 2010. 6. 4
- [5] 강성인, 김주훈, 김은수, 박준호, 허동영, 정용채, "두대의 LLT 변압기 적용 LLC공진 컨버터" 전력전자학회논문지 제 14권 제 6호 pp 431~439