

고집적 스위칭 전원을 위한 LLCT 설계 및 Half-Bridge 직렬공진 컨버터

박진영, 공영수, 김은수, 이해연*(매트론)
전주대학교, 매트론(주)*

LLCT design and half-bridge series resonant converter for high density switching power supply

J.Y. Park, Y.S. Kong, E.S. Kim, H.Y Lee*
Jeonju University, Mattron Co.Ltd

ABSTRACT

High density power supply technology has been researched over the last few years. In this paper, integrated LLCT(Inductor-Inductor-Capacitor-Transformer) structure is described for use in the half-bridge series resonant converter. The structure is analysed by means of FEMM(Finite Element Method Magnetics) and the experimental results of an LLCT structure for a 300W converter are presented.

1. 서 론

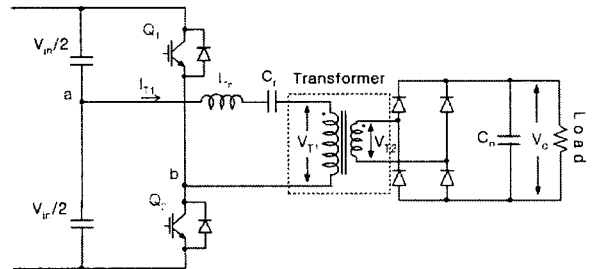
산업용 기기에 적용되는 전원장치의 고 집적화 및 고 기능화를 통한 소형화 기술수요가 증가하고 있다. 이러한 전원장치에 있어서 중요한 부분이 고주파 변압기와 인덕터의 소형화를 들 수 있다. 본 논문 연구에서는 컨버터의 고효율 및 고 집적화와 소형, 경량화를 구현하기 위하여 고 주파용 변압기 코어 자성재료 및 평판 세라믹 커패시터를 적용한 LLCT(Inductor-Inductor-Capacitor-Transformer) 고집적 평면 변압기(Planar Transformer)를 설계 및 전자장해석을 하고 이를 적용한 300kHz 이상의 스위칭 주파수에서 동작되는 300W급 Half-Bridge 직렬공진 컨버터에 대한 제작 및 실험한 내용을 서술하고자 한다.

2. 본 론

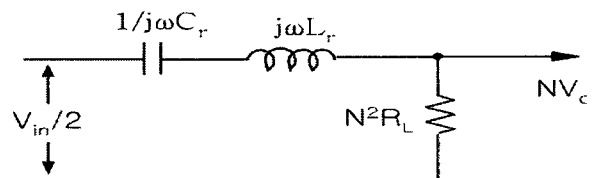
2.1 기존 직렬공진 컨버터의 주회로 특성

그림 1에 직렬 인덕터 L_r 과 직렬커패시터 C_r 그리고 변압기로 구성된 기존 직렬 공진 Half-Bridge DC/DC 컨버터를 나타냈다. 직렬 공진커패시터 C_r 은 변압기 1차 측에 연결되어 있고 공진주파수 $F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$ 에서

직렬공진 인덕터 L_r 과 함께 공진한다. 공진 주파수 F_r 이상의 주파수에서의 스위칭 동작은 공진 주파수 F_r 아래의 주파수에서 스위칭 동작하는 것보다 스위칭소자의 소프트스위칭 등 많은 이유 때문에 스위칭 주파수 제어용 공진주파수 F_r 이상에서 제어하여 사용하고 있다. [1] 여기서 변압기 Magnetizing Inductance는 변압기 누설인덕턴스에 비해 크다고 가정하고 무시하면 그림 1(a)의 직렬공진 Half-Bridge DC/DC 컨버터는 그림 1(b)의 등가회로로 대치하여 표현할 수 있다.



(a) 직렬공진 Half-Bridge DC/DC 컨버터 주회로



(b) Half-Bridge DC/DC 컨버터의 등가회로

그림 1. 기존 직렬 공진 컨버터와 등가회로

이때의 직렬공진 Half-Bridge DC/DC 컨버터에 대한 입력 출력 이득 비는 아래 수식과 같다.

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{1}{1 + j \frac{\omega_s L_r}{RN^2 k^2} \left(\frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega} \right)} \quad (1)$$

여기서, $\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$ 이다.

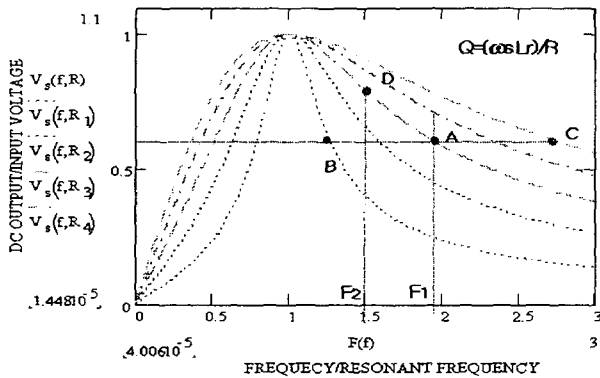


그림 2. 기존 직렬 공진인버터의 전압 이득

기존 직렬 공진 Half-Bridge DC/DC 컨버터는 부하전류의 경로에 직렬로 공진회로가 구성되므로 순환전류가 존재하지 않고 부하전류에 비례하는 공진전류가 흐르는 장점을 가진다. 하지만, 스위칭전원을 고 집적화 하기 위해서는 직렬공진 컨버터를 구성하는 직렬공진 커패시터 C_r 및 직렬 공진 인덕터 L_r 를 개별적으로 사용하여 스위칭전원을 구성할 경우 부피 및 중량이 증가하여 스위칭 전원을 고집적화 하는데 한계성을 갖게 된다.

2.2 LLCT고집적 변압기 적용 직렬공진 Half-Bridge 컨버터 주회로 특성

스위칭 전원의 집적화를 위해서는 필요공간을 가장 많이 차지하는 구성부품을 집적화 하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 스위칭전원의 주회로 방식인 직렬공진 Half-Bridge DC/DC 컨버터를 구성하는 직렬공진요소 (L_r , C_r)를 하나의 구성요소로 집적화 하기위해 고주파 변압기의 1, 2차권선 사이에 그림 3처럼 저 투자율의 Leakage Layer와 세라믹커패시터를 삽입함으로써 고주파 변압기를 집적화시킴으로 스위칭전원을 고집적화 하고자 했다. 고주파 변압기에 저 투자율의 Leakage Layer를 적용함으로써 고주파 변압기의 누설인덕턴스가 증가하게 됨으로 직렬공진요소로 필요로 하는 직렬 인덕터 L_r 로 대체할 수 있다.

하지만, 저 투자율의 Leakage Layer 적용에 의해 변압기 자화인덕턴스(Magnetizing Inductance) L_m 이 기존 변압기에 비해 매우 작은 값을 가지게 됨으로 변압기 자화전류(Magnetizing Current) I_m 이 증가하게 되어 효율을 저감 시킬 수 있다. 그리고 그림 3의 고집적 변압기를 적용한 직렬공진 DC/DC 컨버터 등가회로에 나타난 것처럼 기존 Half-Bridge 직렬공진 DC/DC 컨버터에서 고려하지 않았던 자화인덕턴스(Magnetizing Inductance)

L_m 을 고려해야 함으로 출력전압(V_o) 대 입력전압(V_{in})의 비인 이득특성이 기존 변압기를 사용 했을 때와는 다른 이득특성을 갖게 된다. 따라서 저투자율의 Leakage Layer와 세라믹 커패시터가 삽입된LLCT(Inductor-Inductor-Capacitor-Transformer) 고집적화 변압기를 적용한 Half-Bridge 직렬공진 DC/DC 컨버터 주회로 특성에 대해 서술하고자 한다.

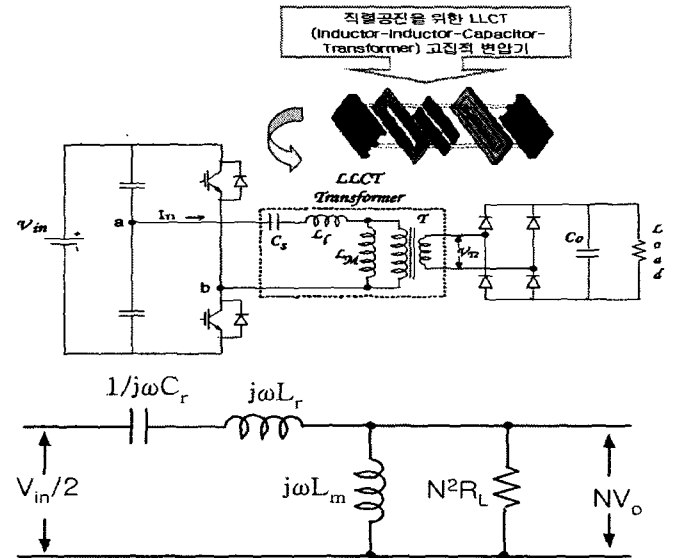


그림 3. LLCT 변압기 적용 Half-Bridge 직렬공진 컨버터 및 등가회로

$$V(f, R) := \frac{1}{N} \left| \frac{1}{1 + L_e - \beta(f) + \frac{R_p}{R} \alpha + jQ_s(f, R) \left(\frac{f}{f_s} - \frac{f_s}{f} \right) + jQ(f)} \right| \quad (2)$$

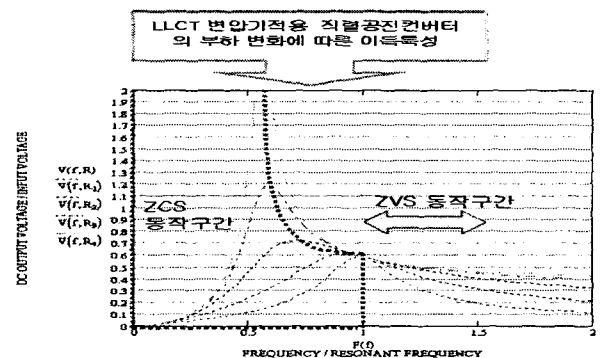


그림 4. LLCT 변압기 적용 Half-Bridge 직렬공진컨버터의 입-출력 전압이득특성 직렬공진

그림 1의 기존 Half-Bridge 직렬공진 DC/DC 컨버터의 전압이득특성 시뮬레이션 결과에 나타난 것처럼 모든 부하에 대해 직렬공진요소인 직렬 인덕터 L_r , 직렬커패시터 C_r 에 의해 결정되는 직렬공진주파수 f_s 점에서는 출력전압과 입력전압의 비인 전압이득특성이 1(Unit

Gain)인 특성을 지니고 있다. 그런 반면, LLCT를 적용한 직렬공진 Half-Bridge DC/DC 컨버터는 전개된 수식(2)의 전압이득 특성과 그림 4의 시뮬레이션 결과에 나타난 것처럼 출력전압과 입력전압의 비인 전압이득특성이 부하에 따라 다른 전압이득특성을 갖고 있고, 특히 경 부하로 갈수록 높은 전압이득특성을 갖는 것을 볼 수 있다. 이러한 특성을 근거로 기존 Half-Bridge 직렬공진 DC/DC 컨버터에 있어서 넓은 스위칭주파수 범위에서의 출력전압제어를 하는 것과는 달리 LLCT 고집적 변압기 적용 Half-Bridge 직렬공진 DC/DC 컨버터에서는 짧은 제한된 주파수범위에서 중 부하에서부터 경 부하까지 출력전압을 제어 할 수 있는 특성을 갖는다. 하지만, 그림 4의 시뮬레이션 결과에 나타난 바와 같이 전압이득특성 곡선에 있어서 L_r 과 C_s 에 의해 결정되는 직렬공진주파수 f_s 이상 높은 주파수 영역 동작 상태에서는 모든 부하 범위에 있어서 영전압 스위칭 (ZVS : Zero Voltage Switching) 동작을 하지만, 직렬공진주파수 f_s 보다 낮은 주파수 동작영역 상태에서는 부하조건에 따라 영전압 스위칭 (ZVS) 동작구간과 영전류 스위칭[ZCS : Zero Current Switching, 이 구간에서는 하드스위칭 (Hard Switching) 함에 따라 스위칭소자에 높은 서지 전압이 발생한다] 동작구간으로 나누어지게 된다.

즉, 공진주파수 f_s 보다 낮은 주파수 영역의 동작 점에서는 그림 4의 시뮬레이션결과에 나타난 바와 같이 부하조건에 따른 전압이득 특성곡선의 기울기가 위로 향했을 경우(Positive) 영전류 스위칭 (ZCS : 1차 측 전류 I_1 이 단자전압(V_{ab})보다 앞서게 되어 하드스위칭을 함) 동작구간이고, 전압이득 특성곡선의 기울기가 아래로 향했을 경우(Negative) 영전압 스위칭 (ZVS: 1차측 전류 I_1 이 단자전압(V_{ab})보다 지연되어 동작됨으로 영 전압스위칭 동작을 함) 구간이 된다. 따라서 직렬공진주파수 f_s 보다 낮은 주파수 영역에서 동작되는 경우 경 부하(Light Load)에서 중 부하(Heavy Load)로의 갑작스런 부하변동시 영전압 스위칭(ZVS) 동작구간에서 영전류 스위칭(ZCS) 동작구간으로 전이 되어 갑작스런 하드스위칭(ZCS 영역으로 전이) 함에 따라 스위칭소자에 인가되는 스위칭 서지전압에 의해 스위칭 소자가 소손되는 위험성을 갖고 있지만 모든 부하범위에 의해 영전압 스위칭을 확보함으로써 효율이 개선되는 특징을 갖고 있다.

2.3 LLCT의 설계 및 FEMM을 적용한 전자장 해석

FEMM(Finite Element Method Magnetics)이라는 전자장 해석을 할 수 있는 소프트웨어에 실제 직렬 공진컨버터에 적용한 Parameter값과 같게 Main Core는 투자율이 1400인 3F3 재질의 EE32 Planar Core 재질과 B-H특성조건을 주고 1차측 턴 수 : 8, 2차측 턴 수 : 4로 하는

병렬 2 Layer를 적용하였다. 그리고 1차 권선은 Skin Depth을 고려하여 폭: 1.4mm 높이: 0.2로 하고 2차 권선은 폭: 3.5mm 높이: 0.2로 하였다. 또한, Leakage Layer는 투자율이 45로 Main Core보다 낮은 특성을 갖는 CK45라는 분말 Core를 적용하고 그 특성을 분석하였다.

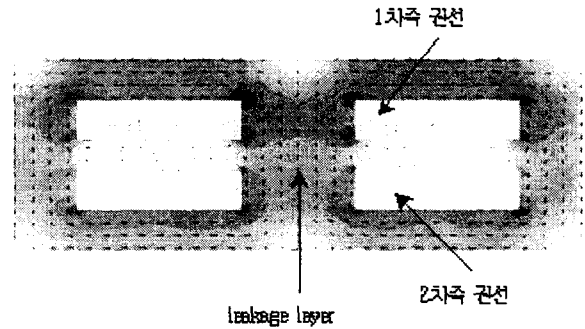


그림 5. FEMM을 이용한 주 지속 분포

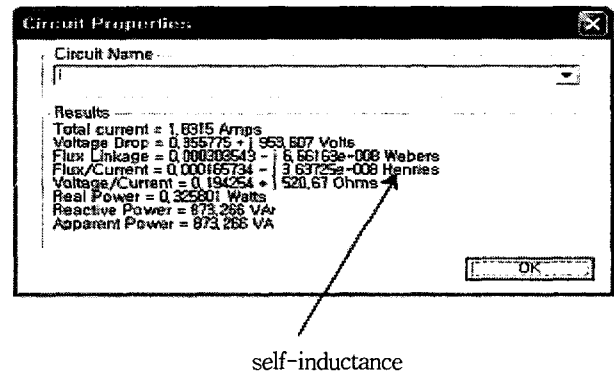


그림 6. FEMM을 통한 자기인덕턴스 값

그리고 여자전류(Magnetizing Current)를 구하고 2차측을 Open한 상태에서 시뮬레이션 한 결과는 위의 그림과 같다. 그 결과 1차 권선에 흐르는 여자전류 1.83A에 대해 약 $165.734 \mu H$ 의 자기 인덕턴스 값을 구할 수 있었다. 그러나 실제의 자기 인덕턴스 값은 1차권선구조가 회로 적으로 3층으로 병렬연결 되어 있으므로 자기 인덕턴스 $L_{self} = 55.25 \mu H$ 를 얻을 수 있었다. 그리고 실제 측정된 변압기의 자기 인덕턴스는 $50.9 \mu H$ 를 얻었다. 따라서 위의 결과를 통해 약간의 오차가 있긴 했지만 설계한 변압기의 특성을 FEMM이라는 소프트웨어를 통해서 쉽게 알 수 있었다.

2.4 LLCT구조 및 설계

측정된 변압기의 1차측 자기인덕턴스(L_p)와 2차측 자기인덕턴스(L_s), 1차측 등가 누설인덕턴스(L_{eq})값을 적용하여 아래의 수식(3)~(5)에 적용하여 1차측 자화인덕턴스(L_{mp})와 1차측 누설인덕턴스(L_{lp}), 2차측 누설인덕턴스(L_{ls})를 아래 표 I에 나타내었다. 이 값을 이용하

여 그림 4의 공진특성을 얻을 수 있다.

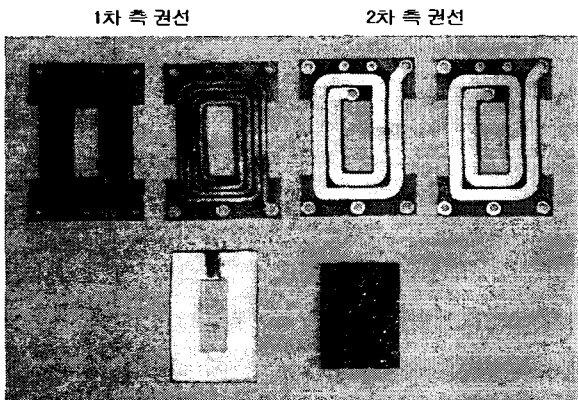
$$L_{mp} = N\sqrt{L_p L_s - L_{eq} L_s} \quad (3)$$

$$L_{lp} = L_p - L_{mp} \quad (4)$$

$$L_{ls} = \frac{L_{mp}(L_{lp} - L_{eq})}{N^2(L_{eq} - L_{lp} - L_{mp})} \quad (5)$$

표 1 LLCT 변압기 설계 사양

항목	사양	항목	사양
core	Planar EE32	μ_e	≈ 1400
Ae	130 mm ²	μ_o	$4\pi \cdot 10^{-7}$
l_e	41.4 mm	N(턴수비)	8:4
직렬공진 Half-Bridge DC/DC Converter LLCT 변압기의 Parameters			
측정된 1차측 자기인덕턴스 (L_p)	50.9 μH		
측정된 2차측 자기인덕턴스 (L_s)	13 μH		
1차측 자화인덕턴스 (L_{mp})	45.5 μH		
측정된 1차측 등가 누설 인덕턴스 (L_{eq})	11 μH		
1차측 누설인덕턴스 (L_{lp})	5.4 μH		
2차측 누설인덕턴스 (L_{ls})	1.6 μH		
1차측 공진커패시터 (C_r)	11 nF		



1차 측 권선 2차 측 권선
Ceramic Capacitor Leakage Layer를 위한 저 투자율 분말 자성체

그림 7. LLCT 변압기 1, 2차 권선과 세라믹 커패시터 및 저투자율 Leakage Layer

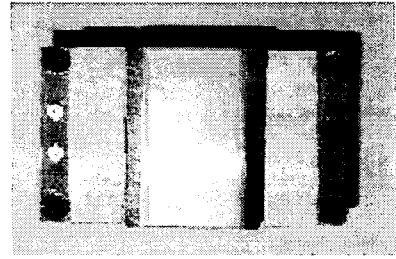


그림 8. 300VA LLCT 고집적변압기 시제품 제작사진

125 실험결과

그림 9~11의 실험파형은 표 II의 사양에 의해 제작된 실험파형으로 부하가 40 Ω , 입력전압 AC220V, 주파수가 300kHz일 경우의 스위치의 Drain-source간 양단 전압 (V_{ds}), 1차측 공진전류 (I_1), 변압기 2차측 양단 전압 (V_{T2})과 전류 (I_2) 그리고, 출력전압 ($V_o=110V$)에 대한 용량이 300W인 파형을 보여주고 있다.

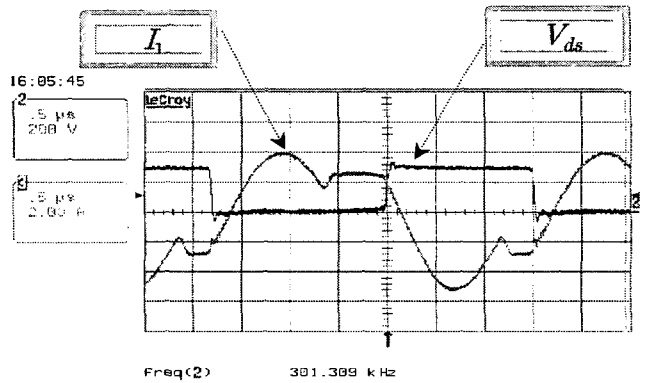


그림 9. 302W, 300kHz 스위칭동작에서 LLCT 고집적변압기적용 Half-Bridge 직렬공진 컨버터의 전압 (V_{ds})와 1차 측 공진전류 (I_1) 실험파형 (200V/Div, 2A/Div)

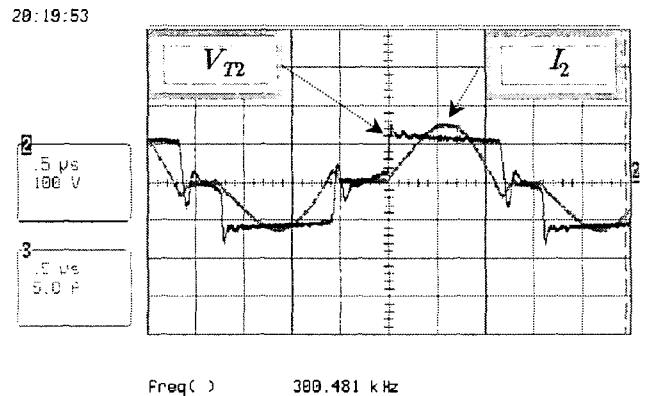


그림 10. 302W, 300kHz 스위칭동작에서 LLCT 고집적변압기적용 Half-Bridge 직렬공진컨버터의 변압기 2차측 양단전압 (V_{T2})와 2차측 전류 (I_2) 실험파형 (100V/Div, 5A/Div)

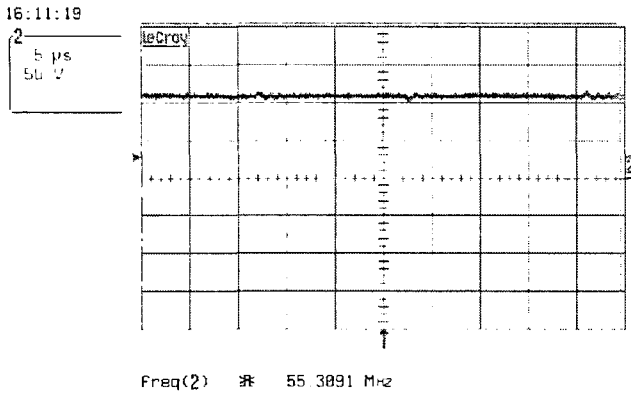


그림 11. LLCT 고집적변압기적용 Half-Bridge 직렬공진컨버터의 출력전압 (V_o)
(50V/Div, 0.5 μ s/Div)

LLCT적용 300W급 Half-Bridge 컨버터를 제작하여 실험하였고, 제작한 전원장치 시제품 사양은 표 II와 같다.

표 II 컨버터 동작조건 및 사용된 소자

항 목	사 양
주회로	Half-Bridge DC/DC
입력전압	220VAC \pm 10%
출력전압	DC 110V
출력전류	DC 0~3A
스위칭 주파수(fs)	300~450 kHz
스위칭 소자	IRFB18N 50K 500V, 17A
출력정류다이오드 D_1, D_2, D_3, D_4	DSEP 29-12A 1200V, 30A

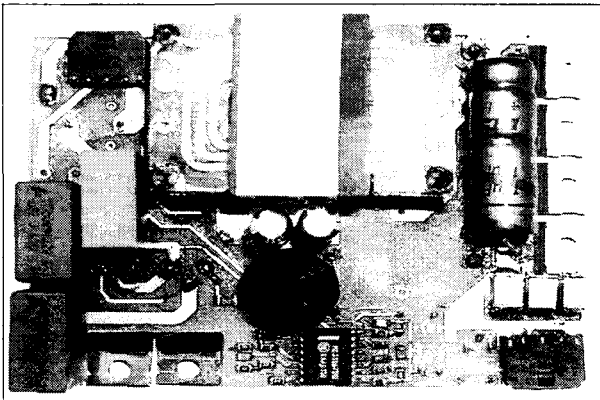


그림 12. MC34067DW Controller 적용 직렬공진컨버터 시제품 사진

3. 결 론

본 논문에서는 컨버터의 고효율 및 고 집적화와 소형, 경량화를 구현하기 위하여 고 주파용 변압기 코어 자성 재료 및 평판 세라믹 커패시터를 적용한 LLCT(Inductor-Inductor-Capacitor-Transformer) 295VA/in³인 전력밀도를 가지는 고집적 평면 변압기 (Planar Transformer)를 설계 및 전자장해석을 하여 이를 적용하고 300kHz 이상 구동을 위한 Mosfet 구동 회로 및 제어회로 설계와 PCB Artwork에 의한 시제품 제작 실험을 통하여 38W/in³의 전력밀도를 가지는 고밀도 전원용 직렬공진 Half-Bridge DC/DC 컨버터를 구현하였다.

참 고 문 헌

- [1] Robert L. Steigerward, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies", *IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 3, pp.172-182, 1988.*
- [2] W. Chen, G. Hua, D. Sable and F.C. Lee, "Design of high efficiency, low profile, low voltage converter with integrated magnetics", *IEEE-APEC'97, pp. 911-917, 1997.*
- [3] I.W. Hofsajer, J.A. Ferreria and J.D. van Wyk, "Design and Analysis of Planar Integrated L-C-T Components for Converters", *IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 15, No. 6, Nov. 2000, pp. 1221-1227*
- [4] J.T. Strydom, J.D. van Wyk, J.A. Ferreira, "Some limits of integrated LCT modules for resonant converters at 1 MHz.", *IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 3, May/Jun. 2001, pp.820-828.*