

다 출력 LLC 직렬 공진 컨버터

강성인, 김주훈, 김은수[†], 박준호*, 이현관*, 허동영*
전주대학교, LG이노텍*

Multi-Output LLC Series Resonant Converter

S. I. Kang, J. H. Kim, E. S. Kim[†], J. H. Park*, H. K. Lee*, D. Y. Huh*
Jeonju University, LG Innotek*

ABSTRACT

최근 PDP Display 시장은 해를 거듭 할수록 가격 경쟁이 치열해 지고 있다. 그에 따라 PSU(Power Supply Unit) 모듈의 저 가격화 및 경량화가 요구되고 있고, 요구조건을 만족하기 위해 여러 출력을 하나로 통합화 하는 다 출력 구조의 변압기가 적용되고 있다. 본 논문에서는 서스테인 전원부(V_s)와 어드레스 전원부(V_a), 그리고 Multi 18V전원부(V_m)를 하나의 변압기에 일체화 하였다. 그리고 어드레스 전원부(V_a)와 Multi 18V 전원부(V_m)의 부하 추가에 따라 서스테인 전원부(V_s)의 전압 이득 특성 및 공진특성 변화를 확인하였다. 또한 다 출력 LLC 직렬공진 컨버터 설계 시 고려사항과 동작 특성으로 42인치 HD PDP 전원부에 적용하여 검증한 결과에 대하여 서술 하였다.

1. 서론

최근 평면 디스플레이의 기술이 발전하면서 디스플레이 장치들이 대형화 되어가고 있다. 그 중에서도 PDP(Plasma Display Panel) 컬러 TV의 경우 제품의 크기 및 무게저감, 높은 전력밀도와 효율 특성 등을 요구하고 있으며 해를 거듭 할수록 치열한 가격 경쟁으로 인한 저 가격화를 가장 중요시 하고 있다. 따라서 최근에는 높은 전력밀도 및 부품 단가를 저감시키기 위해 여러 개의 출력을 하나의 변압기에 통합화 한 다 출력 구조의 LLC 직렬 공진컨버터가 적용되고 있다. 이러한 다 출력 구조의 LLC 직렬 공진컨버터는 출력 부하에 따라 전압 이득 특성 및 등가 공진 주파수가 달라지기 때문에 설계 시 반드시 고려되어야 한다.

2차측 출력 단이 다 출력 구조가 되면 2차측이 병렬 구조로 되기 때문에 각 출력단 부하의 추가에 따라서 전압 이득특성이 저감되기도 하지만 등가 누설 인덕턴스(L_{eq})가 작아지게 되고 그에 따라 공진 주파수가 상승하게 된다. 그러므로 LLC 공진 컨버터의 설계 및 동작에 있어서 중요한 요소로 작용하게 된다.

따라서 본 논문에서는 그림 1에서처럼 서스테인 전원부(V_s Block)와 어드레스 전원부(V_a Block), 그리고 Multi 18V(Multi Block)전원부를 하나의 변압기에 일체화 한 LLT 변압기 적용 다 출력 LLC 직렬 공진컨버터에 대해 이론적으로 해석하고 시뮬레이션 하였으며, 42인치 HD PDP TV에 적용하여 실험한 결과에 대해 서술하였다.

2. 주회로 구성

기존 PDP PSU(Power Supply Unit)는 PFC 블록과 V_s 전원부와 V_a 전원부가 통합된 블록(V_s & V_a Block), 그리고 18V 나 12V, 5V등 저 전원들로 이루어진 멀티 블록(Multi Block)으로 구성되어 있었다. 하지만 본 논문에서는 Multi 전원부(V_m)에서 18V 전원부를 서스테인 전원부(V_s)와 어드레스 전원부(V_a)로 통합화 하여 한 변압기에 추가 하면서 Multi 전원부(V_m)의 변압기 사이즈를 축소하였고, 스위칭 주파수를 높여 다 출력 LLT 변압기(Multi-Output LLT Transformer) 사이즈 또한 줄여 단가 저감 효과를 얻을 수 있도록 하였다.

그림 1은 LLT 변압기 적용 다 출력 LLC 직렬 공진컨버터의 개념도를 나타낸 것이다. 적용된 주 회로는 LLC 직렬공진 컨버터로 구성되어 있고, 서스테인 전원부(V_s)의 출력 전압을 제어한다. 그리고 어드레스 전원부(V_a)와 Multi 18V(V_m) 전원부는 Linear Regulator를 사용하여 일정 출력전압을 제어한다.

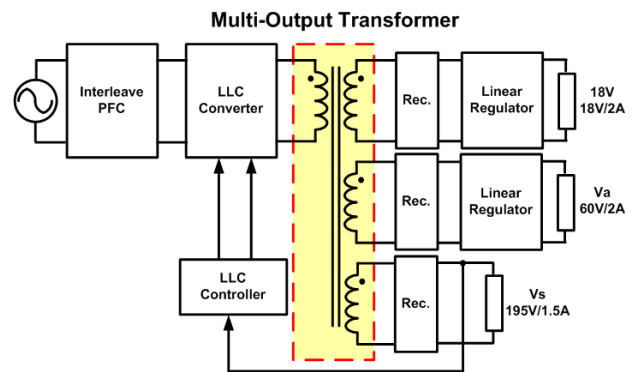
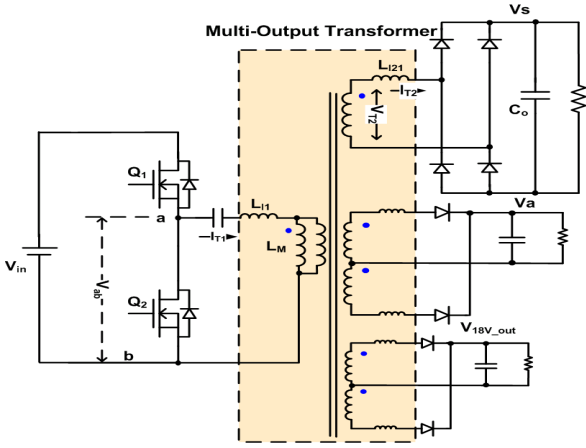


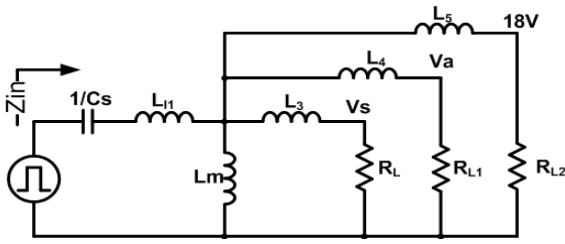
그림 1. 다 출력 LLC 컨버터 제어 개념도

3. 다 출력 LLC 직렬 공진컨버터

그림 2(a)는 다 출력 LLC 직렬공진 컨버터의 주 회로이고 그림 2(b)는 그림 2(a)의 주 회로를 T형 등가회로로 변환한 등가 회로도 이다. 1차측 누설 인덕턴스를 L_{l1} , 자화 인덕턴스를 L_m , 1차측으로 반영(Reflected)된 각 출력단의 2차측 누설 인덕턴스를 L_3, L_4, L_5 로 표현하였다. 또한 각 출력단의 정류 다이오드와 필터 커패시터, 그리고 부하 저항을 등가화한 등가 부하저항을 각각 R_L, R_{L1}, R_{L2} 로 표현하였다.



(a) 주 회로도



(b) 등가회로

그림 2. 다 출력 LLT 변압기 주 회로와 등가회로

본 논문에서는 Va 전원부와 18V 전원부를 Linear Regulator를 사용하여 일정 출력전압을 제어한다. 그러므로 다 출력 LLT 변압기 설계 시 Va 전원부와 18V 전원부의 Linear Regulator의 발열을 줄이기 위해 부하 변동 시(Vs : Dynamic 1.5A(I_{T2}=8peak) 입출력 전압 차를 최소화해야 한다. 따라서 2차측 누설 인덕턴스는 가능한 한 줄여 단락과 개방 시의 전압 변동 폭을 최소화 시킬 수 있도록 설계해야 한다.

3. 1. 다 출력 LLT 변압기 설계

본 논문에서는 Vs 전원부와 Va 전원부, 그리고 18V 전원부를 하나의 변압기에 일체화 하였다. 그리고 Vs 전원부의 출력을 제어하고 출력용량(Vs:195V/1.5A, Va:60V/2A, 18V:18V/2A)이 가장 크다. 그러므로 다출력 LLT 변압기는 Vs 전원부를 기준으로 설계하되 다이내믹 과부하(1.2kW, 60Hz)조건을 고려하고, Va 전원부와 18V 전원부의 용량을 추가하여 설계하였다. LLC 공진 컨버터는 1차측 누설인덕턴스(L₁₁)와 2차측 누설인덕턴스(N²L₁₂), 그리고 자화 인덕턴스(L_m)의 비율인 A(L₁₁/L_m)와 B(N²L₁₂/L_m)에 의해 이득특성이 달라진다. 본 논문에서는 A, B 비율을 각각 0.22, 0.24로 선정하여 설계를 하였다.

표 1. LLC 직렬공진 컨버터의 요구된 입출력 설계사항

| | | |
|------------------------|---|---|
| 입력전압(V _{in}) | 320V _{DC} ~ 400V _{DC} | |
| 출력전압 | V _{s,out} | 185V _{DC} ~ 200V _{DC} |
| | V _{a,out} | 60V _{DC} |
| | V _{18V,out} | 18V |
| 출력전류 | I _{s,out} | 0.1A ~ 1.5A |
| | I _{a,out} | 0.005A ~ 2A |
| | I _{18V,out} | 0 ~ 2A |

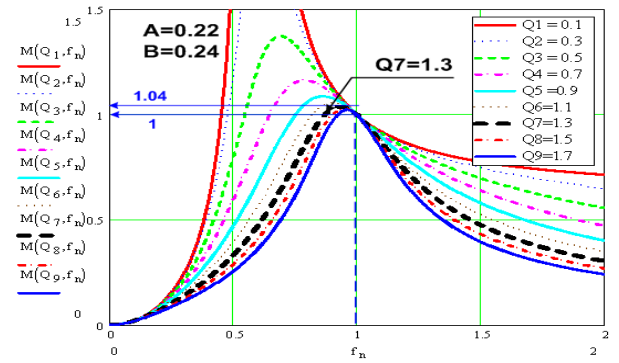


그림 3. Q변화에 의한 전압이득 특성

그림 3은 A를 0.22, B를 0.24로 하고 Q(2πfL_{eq}/R_{ac})를 0.1 ~ 1.7까지 변화시켰을 때의 이득 특성이다. 본 논문에서는 다이내믹 과부하(1.2kW, 60Hz)조건에서도 영전압 스위칭을 이룰 수 있도록 Q를 1.3을 선정하였다. Q값이 정해지면 최대 부하 조건에서의 등가 누설 인덕턴스(L_{eq})가 결정이 되고, 그에 따라 식 (1)에 의해 자화 인덕턴스(L_m)가 결정이 된다. 그리고 자화인덕턴스(L_m)가 결정되면 A, B 비율에 의해 1, 2차 누설 인덕턴스도 계산이 된다.^[4]

$$L_m = \frac{L_{eq}}{\left(A + \frac{B}{B+1}\right)} \quad (1)$$

표 2. 계산된 LLT변압기 파라미터

| | |
|--|--|
| 직렬 커패시터(C _s) | 21.4nF |
| 1차측 누설인덕턴스(L ₁₁) | 26.3uH |
| 2차측 누설인덕턴스(N ² L ₁₂) | 28.7uH |
| 자화 인덕턴스(L _m) | 120uH |
| A(L ₁₁ /L _m) | 0.22 |
| B(N ² L ₁₂ /L _m) | 0.24 |
| N(n ₁ /n ₂) | 1.238 (n ₁ =26, n ₂ =21) |

그림 2의 등가회로에서 3개의 출력이 단락일 때의 누설 인덕턴스(L_{eq,total})는 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다. 그러므로 다 출력 LLC 직렬공진 컨버터의 공진주파수는 직렬 커패시터(C_s)와 등가 누설인덕턴스(L_{eq,total})가 공진 할 때의 주파수로 공진주파수는 $f_r = 1/2\pi \sqrt{L_{eq-total} C_s}$ 이다. 그리고 정규화 된 값들과 전압이득 수식은 식 (2)부터 식(7)에 나타내었다.

$$K_1 = j2\pi f L_3 + N^2 R_L \quad (2)$$

$$S_1 = j2\pi f L_4 + N^2 R_{L1} \quad (3)$$

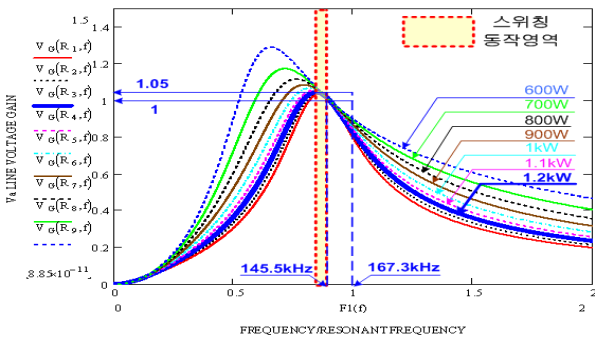
$$M_1 = j2\pi f L_5 + N^2 R_{L2} \quad (4)$$

$$L_{eq-total} = L_{11} + \frac{L_m \frac{L_3 L_4 L_5}{L_3 L_4 + L_4 L_5 + L_5 L_3}}{L_m + \frac{L_3 L_4 L_5}{L_3 L_4 + L_4 L_5 + L_5 L_3}} \quad (5)$$

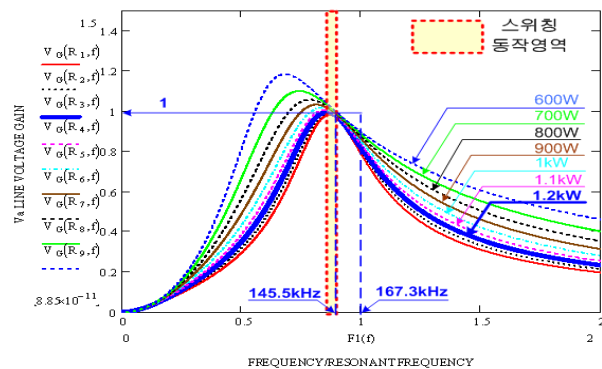
$$Z_{in} = j2\pi f L_{11} + \frac{1}{j2\pi f C_s} + \frac{j2\pi f L_m K_1 M_1 S_1}{j2\pi f L_m (K_1 M_1 + M_1 S_1 + K_1 S_1) + K_1 M_1 S_1} \quad (6)$$

$$V_G = \frac{N}{Z_{in}} \left| \frac{R_L}{1 + \frac{L_3}{L_m} - \frac{jN^2 R_L}{2\pi f L_m} + \frac{K_1}{S_1} + \frac{K_1}{M_1}} \right| \quad (7)$$

그림 4는 식 (7)과 표 2의 변압기 파라미터를 적용하여 다출력 LLC 공진컨버터의 전압이득 특성을 나타내었다. Vs 전원부 (Vs:195VDC, 1.5A)와 Va 전원부 (Va:65VDC, 2A), 그리고 18V 전원부 (Vm:18VDC, 2A) 전체를 고려하였을 때 입력전원과 Vs 전원부의 전압이득 특성을 나타낸다.



(a) Va 전원부와 18V 전원부가 경부하일 때 (Va:0.005A, 18V:0A)



(b) Va 전원부와 18V 전원부가 Nominal 부하일 때 (Va:0.8A, 18V:1A)
그림 4. 다 출력 LLC 직렬공진 컨버터 전압이득 특성

전압이득 특성 그래프의 가로축은 스위칭 주파수와 공진 주파수의 비율이고, 세로축은 입력 대 출력의 전압 이득이다. 그림 4(a)는 Va 전원부와 18V 전원부를 경부하 및 무부하 조건 (Va:0.005A, 18V:0A)으로 하고 Vs 전원부의 부하를 다이내믹 과부하를 고려하여 600W에서 1.2kW까지 변화 시켰을 때의 이

득 특성이다. 그리고 그림 4(b)는 Vs 전원부의 부하를 600 W~1.2kW까지 변화를 시키고 Va 전원부(Va)와 Multi 전원부 (Vm)의 부하는 모듈이 최대 부하 상태일 때의 조건인 Nominal Load(Va:0.8A, 18V:1A)를 각각 입력 하였다. 여기서 다이내믹 부하란 PDP 모듈의 부하특성과 비슷한 부하 조건을 만들어 주기 위해 전자부하 상에서 60Hz 에 한 번씩 1ms의 폭을 갖는 펄스형 정현파를 발생 시켜주는 부하이다. 그림 4(a)와 (b)의 시뮬레이션 결과 부하가 늘어남에 따라 등가 공진주파수는 변함이 없으나 이득이 5% 감소(1.05→1)하는 것을 볼 수 있다. 또한 다 출력 구조가 되면 각각의 누설 인덕턴스는 병렬이기 때문에 총 누설 인덕턴스(L_{eq,total})가 줄어들게 된다. 그러므로 공진 주파수는 Vs 전원부만을 고려했을 경우 145.5kHz였던 것이 167.3kHz로 상승하게 된다. 하지만 실제적으로 PDP 모듈에서 모든 출력이 중부하일 조건은 존재하지 않고, Vs 전원부의 용량이 다른 출력에 비해 상대적으로 클 뿐만 아니라 Vs 전원부의 출력을 제어하기 때문에 스위칭 주파수와 이득 특성은 Vs 전원부의 특성에 의해 지배적으로 나타나게 된다. 따라서 다 출력 LLT 변압기 설계 시 Vs 전원부의 최대 부하 조건에서도 안정적인 스위칭 동작을 위해 Va 전원부와 18V 전원부의 과부하 조건까지 감안하여 이득 마진을 갖도록 설계하는 것이 중요하다.

4. 실험결과

표 2의 변압기를 42인치 HD PDP TV 전원장치에 적용하여 실험을 하였다. 그리고 적용된 주요 정격을 표 3에 나타내었다.

표 3. 측정된 다출력 LLC 변압기 파라미터

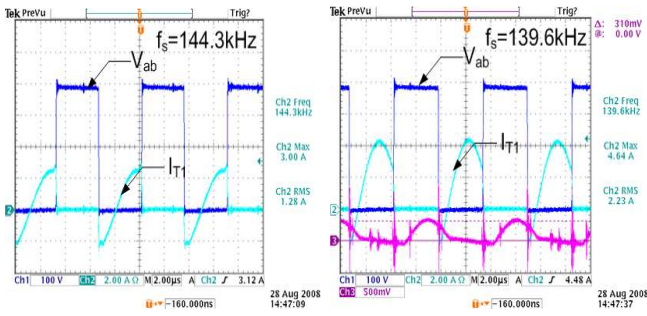
| | Vs단 | Va단 | 18V단 |
|--|------------------|-----------------|--------------|
| 1차측 누설인덕턴스(L ₁₁) | 31.2uH | 31.2uH | 18.35uH |
| 2차측 누설인덕턴스(N ² L ₁₂) | 35.9uH | 39.2uH | 91.71uH |
| 자화 인덕턴스(L _m) | 138.8uH | 138.8uH | 151.6uH |
| A(L ₁₁ /L _m) | 0.225 | 0.225 | 0.121 |
| B(N ² L ₁₂ /L _m) | 0.259 | 0.282 | 0.661 |
| 등가누설인덕턴스(L _{eq}) | 59.8uH | 61.8uH | 75.5uH |
| 총 등가누설인덕턴스 (L _{eq,total}) | 46uH | | |
| 적용코어 | EER4445 | | |
| N(n ₁ /n ₂) | 1.238 (26/21) | 3.714 (26/7) | 13 (26/2) |

표 4. LLC 직렬 공진컨버터 주요 정격

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| 스위칭 주파수 범위(f _s) | 139kHz ~ 149kHz |
| 공진주파수(f _r) | 167.3kHz |
| 직렬 커패시터(C _s) | 20nF |
| 제어 IC | ST社 L6599D |
| 주 스위칭 소자 | STP14NK50N, 500V, 14A |
| Va Regulator | FQPF10N20C |
| Vs 출력 정류다이오드 | FCF10A40, 400V, 10A |
| Va 출력 정류다이오드 | FCF10A40, 400V, 10A |

그림 5 (a)와 (b)는 전자부하를 이용하여 Va 전원부와 18V 전원부의 부하를 각각 0.8A와 1A(Nominal Load)로 두고 Vs 출력

부하가 Static max 와 Dynamic max($I_{T2}=8A_{peak}$)로 동작할 때의 실험 파형이다. 그리고 그림 6은 전자부하로 검증한 전원장치를 실제 PDP 모듈에 적용했을 때의 실험파형이다. 측정 결과 경부하(0.05A)에서 중부하(2A)로 부하 변화 시 스위칭 주파수는 139.6kHz에서 144.3kHz 사이에서 동작하고, 다이내믹 부하와 실제 PDP TV 모듈의 최대 부하 조건에서 각각 140.6kHz와 141kHz로 동작을 한다. 실험 결과를 통해 그림 4(b)의 전압이득 특성의 스위칭 동작영역과 일치함을 확인하였다.



(a) 경부하(0.05A)일 때 (b) 중부하(2A)일 때
그림 5. 전자로드 적용 실험 시 최대 부하 조건일 때의 실험파형 (CH1 : 100V/div., CH2 : 2A/div., 2us/div.)

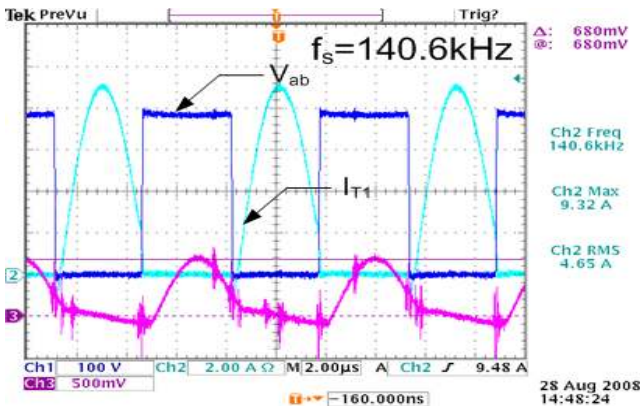


그림 5. 전자로드 적용 실험 시 다이내믹 2A($I_{T2}=8A_{peak}$)일 때의 실험파형 (CH1 : 100V/div., CH2 : 2A/div., 2us/div.)

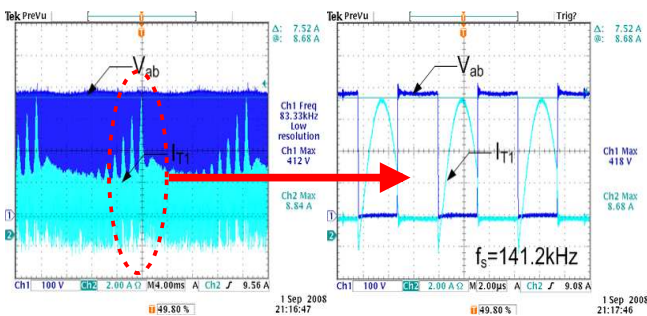
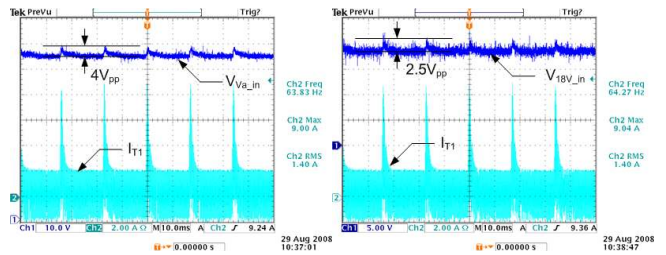


그림 6. PDP TV 모듈에 적용 실험 시 최대 부하 조건일 때의 실험파형 (CH1 : 100V/div., CH2 : 2A/div. 2us/div.)

실험결과 PDP 모듈의 가장 악조건($I_{T1}=7.5A_{peak}$)에서도 ZVS 스위칭을 하면서 안정적인 동작을 하는 것을 확인하였다.

그림 6은 Vs 전원부가 다이내믹 부하 동작 시 Va 전원부의 입력단과 18V 전원부의 입력측 전압 변동 폭을 측정된 파형이

다. Vs 전원부의 부하가 다이내믹 특성에 따라 순간 낮은 주파수로 동작하면서 전압이득이 상승함에 따라 각 입력단의 전압이 상승하는 것을 알 수 있다.



(a) Va 전원부 입력단 전압변동 (b) 18V 전원부 입력단 전압변동
그림 6. 다이내믹 부하 동작 시 Va 전원부와 18V 전원부 입력단 전압변동 및 1차측 단자전류 측정파형 (CH1 : 10V/div., 5V/div., CH2 : 2A/div. 10ms/div.)

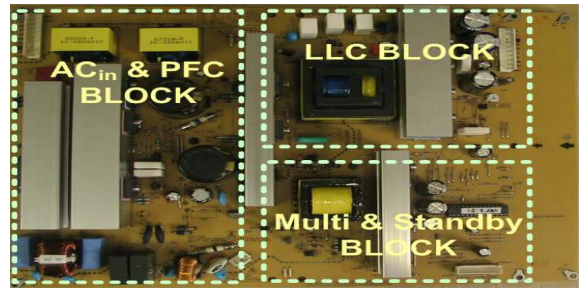


그림 7. 42 HD PDP TV용 PSU 시제품 사진

5. 결론

본 논문에서는 다 출력 구조의 LLC 직렬공진 컨버터에 대해 서술하였다. 또한 부하 동 특성을 고려한 설계와 전압이득 특성을 기본으로 하여 42인치 PDP TV용 전원에 적용하여 실험한 결과를 보였다. 실험 결과 전압이득 특성 및 스위칭 동작 영역을 확인하여 수식을 검증하였고 42인치 HD PDP TV 적용 가능함을 보였다.

이 논문은 LG 이노텍(주)-전주대 산학협력 연구과제의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Jiangtao Feng, Yuequan Hu, Wei Chen and Chau-chun Wen, "ZVS Analysis of Asymmetrical Half-Bridge Converter," IEEE PESC '01, Vol.1, pp.243-247, 2001. 6.
- [2] Robert L. Steigerward, "A Comparison of half-Bridge Resonant Converter Topologies" IEEE Trans, Industrial Electronics, vol. 41, pp.118-124, 1994
- [3] Lin, B.-R., Chen, J.-J. and Yang, C.-L. "Analysis and Implementation of Dual-Output LLC Resonant Converter" IEEE International Conference, Industrial Technology, 2008. pp. 1-6
- [4] 강성인, 윤광호, 김은수, 박준호, 허동영. "LLC 직렬공진 컨버터 동작특성" 전력전자학회 논문지 제 12권 제 6호, 2007. 12.