

## 고 에너지 밀도 펄스 변압기 설계

남상훈\*, 박성수, 하기만  
포항공과대학교 가속기연구소

### Design of A High Energy Density Pulse Transformer

S.H. Nam, S.S. Park, K.M. Ha  
Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH

**Abstract** - A high frequency and energy density pulse transformer is a critical component of a high voltage power supply in a traveling wave tube (TWT) amplifier system. In this paper, processes of design, manufacturing, and test of the transformer are discussed. Primary voltage of the transformer is 240 V. The transformer secondary have two outputs which are 4100 V (Helix) and 2050 V (Collector). Total output power is 860 W. Normal operating frequency of the transformer is 10 kHz. In high energy density pulse transformers, temperature rise is a main problem during its operation. From our study, it was found that resonant current due to leakage inductance and stray capacitance was the main cause of temperature rise. This happens because of the inherently high turn-ratio in high voltage transformers. Solutions to reduce stray components are presented.

#### 1. 서 론

진행파관 증폭기의 구성에 필요한 고전압 전원장치를 효율적으로 제작하기 위하여 필수적인 고주파용 펄스 변압기를 설계, 제작하여 실험하였다. 목적은 TWT 부하를 구동하기 위한 변압기 설계 중에 나타나는 문제점을 구체적으로 파악하고 그 해결책을 모색하는 데 두었다. 특히 고압 펄스 변압기 온도 상승 원인을 구체적으로 파악하는 데 두었다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 펄스 변압기 설계 및 제작

그림 1에는 펄스 변압기 일차와 이차 권선의 사양을 정리하였다.

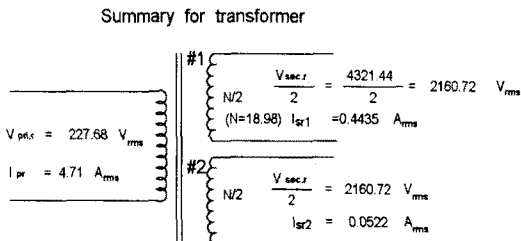


그림 1 변압기 각 권선에서의 전압 전류 값

일반적으로 펄스 변압기 설계의 첫째 과정은 필요한 전력을 충분히 소화할 수 있는 최소 크기의 적절한 형태를 지닌 코어를 선택하는 데 있다. 둘째는 허용 온도 상승을 결정하며, 셋째로 최대 자속 밀도를 결정한다. 주어진 동작 주파수와 자속 밀도 그리고 허용 온도 상승을 이용하여 변압기에서 허용할 수 있는 최대 전력 손실을 계산한다. 코어 손실은 최대 자속 밀도와 허용 주파수를 이용하여 계산된다. 따라서 변압기의 허용 전력 손실로부터 권선에서의 최대 전력 손실을 구할 수 있다. 넷째로 변압기의 일차 권선수와 이차 권선수를 계산한다. 마지막으로 권선에서의 최대 동손을 기준으로 일차 측과 이차 측의 권선의 크기, 길이, 권선층의 형태를 결정하며 Skin 효과와 Proximity 효과에 의한 ac 저항치와 dc 저항치의 비( $R_{ac}/R_{dc}$ )를 계산한 후 전체 동손이 허용 범위 내에 있는지를 확인한다. 이 때 최종적으로 예상되는 온도 상승의 계산도 가능하다. 이러한 과정을 만족되는 값을 얻을 때까지 반복하여 최종 설계에 도달하게 된다. 동작 주파수가 높을 때에는 누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스의 계산도 병행된다.

코어는 MC1750-1D를 사용하였다. 그림 2에는 MC1750-1D 코어를 사용할 경우 권선에 의한 전력 손실, 코어의 전력 손실, 전체 변압기의 전력 손실의 변화를 이론치에 근거하여 계산된 결과를 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 권선에 의한 전력 손실은 사용 자속 밀도가 증가함에 따라 급격히 감소하나 코어의 손실은 증가함을 알 수 있다. 따라서 최소 손실이 약 2500 Gauss에서 형성되고 있다. 이 계산은 단순한 DC 저항과 정격 부하 전류에 따른 코어 손실을 기준으로 계산된 값이며 공진 전류에 의한 영향은 고려되지 않은 결과이다

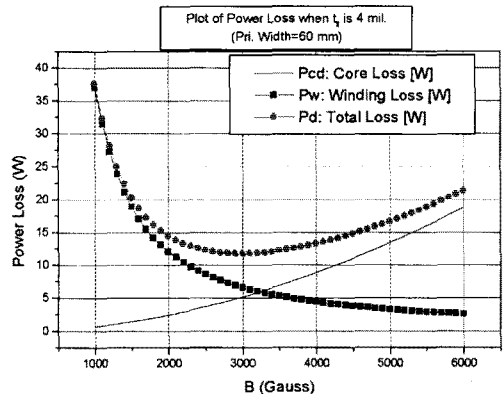


그림 2 자속 변화에 따른 코어 손실, 동손, 전체 손실 (이론치)

표 1 권선 제작 사양

	오른쪽(n), 왼쪽(n') 코어 권선			
권선 순서	1(1')	2(2')	3(3')	4(4')
전압, rms	0.54 kV	114 V	0.54 kV	1.08 kV
전류, rms	0.443 A	4.71 A	0.443 A	0.052 A
권선 형태	HF	Foil	HF	HF
권선 크기	40 AWG	-	40 AWG	34 AWG
권선 높이	99 um	0.05 mm	99 um	191 um
권선 폭	99 um	60 mm	99 um	191 um
총 권선 수	105	22	105	210
권선층 수	1	-	1	1
권선 Strands	20	1	20	1
권선간 절연 두께, (4.0 mil) 4 겹	101.6 um	101.6 um	101.6 um	101.6 um
권선간 절연물	1 mil Skyrol	1 mil Skyrol	1 mil Skyrol	1 mil Skyrol

자속에 따른 변압기의 온도 상승을 이론치를 이용하여 계산된 결과는 그림 2의 전체 변압기 전력 손실과 유사한 경향을 보이며 MC1750 코어를 이용하여 얻을 수 있는 최소 온도 상승은 사용 자속이 2500 Gauss일 때 약 47 °C로 나타났다. 따라서 MC1750 코어를 사용하여 작은 온도 상승을 기대하기는 어렵다는 것을 알 수 있으며 온도 상승 효과는 공진 전류를 고려하면 더욱 악화된다.

펄스 변압기를 4차에 걸쳐 제작하여 실험을 통하여 얻은 결과와 이론적인 계산치를 이용한 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다. 1차 제작 분은 제작 실수로 실험이 진행되지 않았다. 2차 제작은 자속을 3000 Gauss로 설정하여 제작하였고 3, 4차 제작은 6000 Gauss를 사용하였다. 2차 제작과 3, 4차 제작의 또 다른 차이점은 일차와 이차 간, 이차와 이차 간 절연 두께로 2차에는 2 mil (0.05 mm) 절연을 3, 4차에는 4 mil (0.1 mm)을 사용하였다. 3차로 제작된 변압기의 제작 사양이 표 1에 보여진다. 2차(2mil)와 3차(4mil) 제작 분에 대한 누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스를 계산한 결과로부터 누설 인덕턴스는 절연 두께에 따라 변화하지 않고 기생 커패시턴스는 많은 차이가 있음을 알 수 있었다. 이러한 성분에 의한 공진 주파수는 동작 주파수인 10 kHz의 수십 배에 달하지만 충분히 높지가 않기에 때문에 출력 신호에 중첩되어 나타나며 쉽게 검출이 가능하였다. 따라서 공진에 의한 전류 성분은 2차 분(2mil)과 3차 제작분(4mil)에 공히 대단히 큰 전류가 존재함을 알 수 있었다. 이 전류는 이차 측 전류로서 부하 전류인 0.5 A에 비하여 대단히 높다. 즉 현재와 같은 변압기 설계에서는 공진 전류에 의한 온도 상승분이 정격 전류에 의한 온도 상승보다도 더 많을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

### 2.2 변압기 등가회로 시뮬레이션

변압기 등가회로를 이용한 Spice 시뮬레이션을 실행하였다. 그림 3에는 3000 Gauss를 사용하여를 경우 시뮬레이션 결과를 보여주며 2차 제작 분에 해당되는 조건이다. 이때의 공진 주파수는 122.4 kHz로 출력 신호에 중첩되어 나타남을 보여 준다. 공진에 의한 전류가 부하 전류보다 또한 높게 나타남을 알 수 있다. 그림 4에는 6000 Gauss 자속 밀도를 사용하여 제작하였을 경우이며 3차 제작 분에 해당되는 조건이다. 이 때의 공진 주파수는 361.3 kHz이며 이 또한 출력 펄스에 중첩됨을 알 수 있다. 공진 전류의 양은 더욱 증가하여 부하 전류는 대부분이 공진 전류에 의해서만 형성되고 있다.

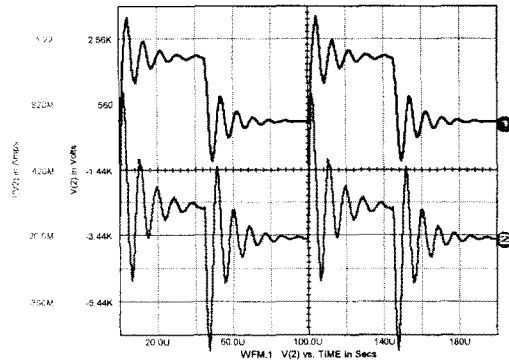


그림 3 시뮬레이션 출력 전압 (상단)과 출력 전류 (하단), 2차 제작 분에 해당  
 $B = 3000 \text{ Gauss}$ ,  $L_L = 2.86 \text{ mH}$ ,  $C_s = 591.4 \text{ pF}$ ,  $R_w = 205.45 \text{ Ohm}$ ,  $R_L = 10\text{kOhm}$

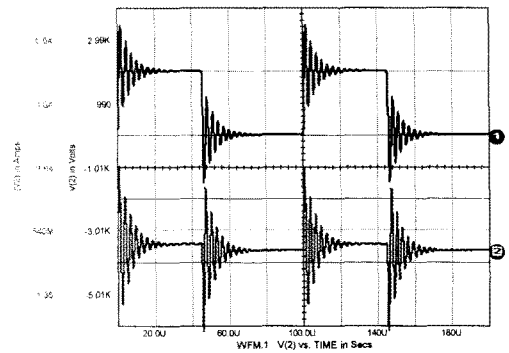


그림 4 시뮬레이션 출력 전압 (상단)과 출력 전류 (하단), 3차 제작 분에 해당  
 $B = 6000 \text{ Gauss}$ ,  $L_L = 0.3 \text{ mH}$ ,  $C_s = 655.7 \text{ pF}$ ,  $R_w = 74.64 \text{ Ohm}$ ,  $R_L = 10\text{kOhm}$

### 2.3 트랜스포머의 시험 및 결과

그림 5는 펄스 변압기를 시험하기 위하여 구성된 시스템 회로 구성을 보여준다. 시험 회로는 실제 전원 장치와 동작 주파수, 듀티, 일차 및 이차 전압, 부하 저항 등 입출력 사양이 유사하도록 동작 조건을 조절하였다. 펄스 변압기 2차와 3차 제작 분은 그림 5에 나타난 바와 다르게 이차 권선을 전부 직렬로 연결한 후 정류하는 형태로 시험하였다. 4차 제작 분은 그림 5에 보여준 바와 같이 6개의 이차 권선이 각각 정류 회로를 거친 후 직렬로 연결하여 최종 전압을 얻었다. 그림 6에는 2차 제작 변압기의 실험 결과를 보여 주고 있고 그림 7에는 3차 제작 변압기의 실험 결과를 보여준다. 그림 6은 그림 3과 그림 7은 그림 4와 비교될 수 있다. 이 두 경우의 비교에서 알 수 있듯이 해석적인 방법에 의한 결과와 실험적인 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 6과 7에서 확연히 알 수 있듯이 초기 스위칭이 일어나는 시기에 공진 전류 값이 매우 큼을 알 수 있다. 이러한 공진 전류는 전체 전원 시스템의 불안정과 펄스 변압기의 온도 상승을 유발한다. 공진 현상을 최소화하기 위한 방법으로 그림 5 회로에 나타난 바와 같이 이차 권선을 여러 개 구성하여 각각의 이차 권선 출력을 정류한 후 재차 직렬로 연결하여 최종 원하는 직류 전압을 얻었다. 이 방법은 누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스를 각각의

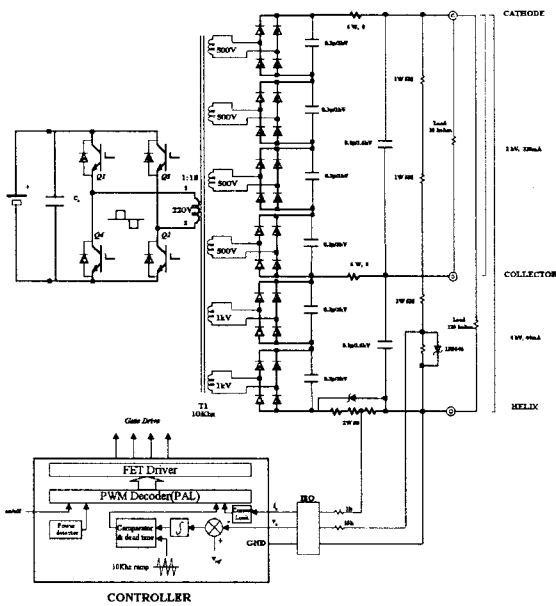


그림 5 펄스 변환기 시험 회로 구성도

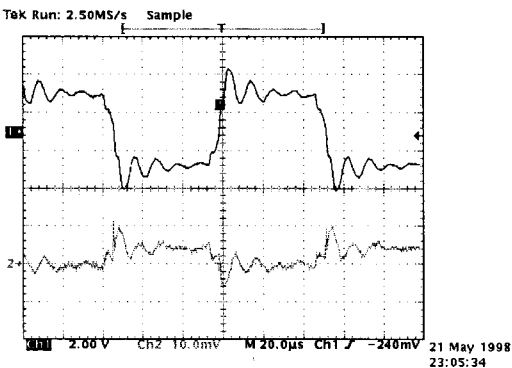


그림 6 2차 제작본 (3000 Gauss, 2 mil) 실험권 r 결과, 10 kHz Switching. 상단: 출력 전압 (2 kV/Div.), 하단: 일차 측 전류 (5 A/Div.)

권선에 분포시킴으로서 공진 현상을 억제하는 방식이다. 이 방법을 사용하여 시험한 결과를 그림 8에 보여주었다. 일차 권선에서의 침두 전압은 약 220 V이며 침두 전류는 2 A, 스위칭 주파수는 10 kHz이다. 그림 8의 파형을 보면 공진 현상이 거의 소멸되었다는 것을 볼 수 있다.

### 3. 결 론

4100 Vdc, 860 W 출력을 가진 진행파관 Helix/Collector 고전압 전원장치에 사용될 고에너지 밀도 펄스 변환기의 각종 변수들을 해석적으로 분석하고 Spice 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 4차에 걸쳐 고압 펄스 변환기를 제작하고 실험하였다. 본 연구의 진행은 고압 펄스 변환기의 온도 상승 원인을 분석하는데 그 중요성을 두었다.

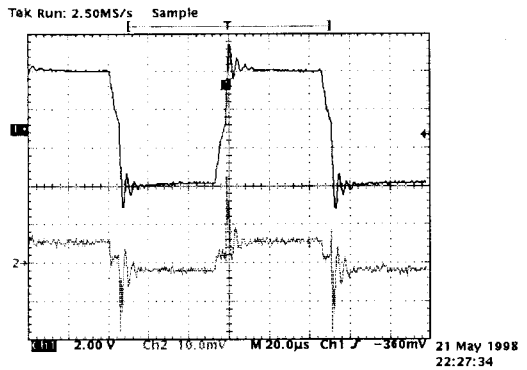


그림 7 3차 제작본 (6000 Gauss, 4 mil) 실험 결과, 10 kHz Switching. 상단: 출력 전압 (2 kV/Div.), 하단: 일차 측 전류 (5 A/Div.)

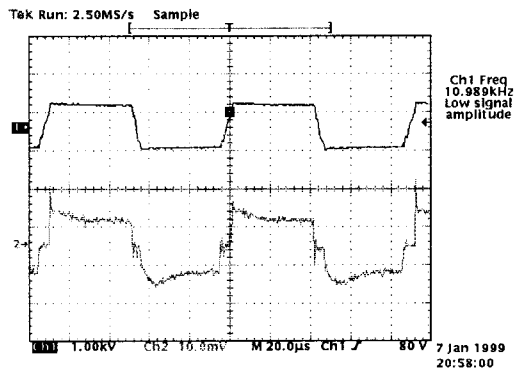


그림 8 4차 제작 펄스 변환기 1 kV 이차 권선 출력 전압 (상단, 1 kV/Div.)과 전류 (하단, 500 mA/Div.) 파형.

이상의 결과로부터 얻은 결론은 고압 펄스 변환기의 제작에서 중요한 부분은 누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스의 값과 그 조합이라는 것이다. 고압 펄스 변환기의 특성인 높은 권선 비는 대체적으로 누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스의 수치를 높이기 때문에 변압기 내의 공진 주파수가 사용 스위칭 주파수에 근접하게 되어 간섭을 일으키게 된다는 결론을 얻었다. 따라서 설계 시 매우 신중하게 여러 계수들을 검토하여 최종 결론을 얻도록 해야겠다. 또한 온도 상승을 저감하기 위해 코어의 크기를 선택할 때 코어의 유효 전력에 중요성을 두는 것 보다는 온도 상승에 우선 중요성을 두어야 하겠다. 누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스를 최소화하는 효과적인 방법은 이차 권선을 여러 개로 분리하여 출력을 정류한 후 재차 직렬로 연결하여 원하는 출력 전압을 얻는 것으로 실험 결과 밝혀졌다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Magnetics Catalog, *Cut Cores*, Butler, PA, USA, 1995.
- [2] A. I. Pressman, *Switching Power Supply Design*, McGraw-Hill, Inc., NY, USA, 1992.
- [3] G. N. Glasoe, J. V. Lebacoz, *Pulse Generators*, McGraw-Hill, Inc., NY, USA, 1948.