

## 수백 kV급 공심형 펄스 변압기 개발

김성철, 박성수, 김상희, 허훈, 남상훈  
포항공대 포항가속기연구소

### Development of several hundred kV Air Core pulse transformer

S. C. Kim, S. S. Park, S. H. Kim, H. H대, S. H. Nam  
Pohang Accelerator Laboratory(PAL), POSTECH

**Abstract** - Cylindrical type air core pulse transformers capable of passing high voltage and energy pulse waveforms with high efficiency and low distortion require a much more delicate design balance of physical dimensions and electrical parameters than iron or ferrite core units. The structure of an air core high voltage pulse transformer is relatively simple, but considerable attention is needed to prevent breakdown between transformer windings. Since the thickness of the windings in spiral type is on the order of sub-millimeter, field enhancement at the edge of the windings is very high. It is, therefore, important to find proper electrical insulation parameter to make the system compact. Several shapes of the winding are considered for air core pulse transformer development. In this paper, we are described design procedure, parameters measure and experiment results of air core type HV pulse transformer.

#### 1. 서 론

공심형 고전압 펄스 변압기는 펄스 성형회로 혹은 절연시험회로와 같은 캐패시터 부하의 충전용으로 사용된다. 변압기는 각 턴 사이에 필름 형태의 절연지 넣고 얇은 종이나 같은 도체를 권선하는 형태로 제작된다. 변압기의 일차는 수 턴까지 권선을 하며 권선의 바깥, 중앙 혹은 안쪽에 배치를 시킨다. 그리고 이러한 변압기는 원통형 형태로 권선이 된다. 원통형 공심 펄스 변압기에서는 고전압, 고 에너지의 펄스 파형을 고 효율, 저 왜곡되게 변환하기 위하여 페라이트 코어를 사용하는 경우보다도 물리적인 크기와 전기적 파라메타 등에서 더 세심한 설계가 요구된다. 공심형 변압기의 장점은 무게가 가볍고 고전압 절연이 단순하다는 것이다. 권선은 주로 아주 얇은 동판을 사용한다. 동판이 아주 얇기 때문에 동판의 끝에서는 아주 큰 전계가 형성된다. 따라서 권선의 각 턴 사이의 절연물과 권선 기술들을 사용하여 권선 끝에서의 전계 강화를 최소화 시켜야 한다.

#### 2. 공심형 고전압 펄스 변압기

##### 2.1 사양

표 1은 펄스 변압기의 기본 사양이다. 변압기의 일차 입력 전압은 50[kV]이고, 펄스 폭은 0.5 ~ 1[ $\mu$ s]이다. 변압기 이차 출력 전압은 500[kV]이다. 따라서 요구되는 변압기의 턴수비는 1:10이다. 변압기에서 허용되는 일차측 인덕턴스는 170[nH]이다.

표 1 공심 고전압 펄스 변압기 사양

Item	value	unit
Primary	inductance	170
	Pulse Width	0.5 ~ 1
	Voltage	50
Secondary	Voltage	500
Turn Ratio	1 : 10	

#### 2.2 펄스 변압기 설계

##### 2.2.1 변압기 구조

변압기 구조는 권선 배치에 대한 편리성을 고려하여 원통형 공심 단권형 펄스 변압기로 선택하였다. 그림 1은 변압기의 구조도이다. 일차권선은 권선의 가장 바깥부분에 배치하고 1 턴으로 하였다. 권선사이의 전계 강도를 줄이기 위하여 일차에서 이차까지 권선의 형태를 테이퍼 모양으로 하였다.

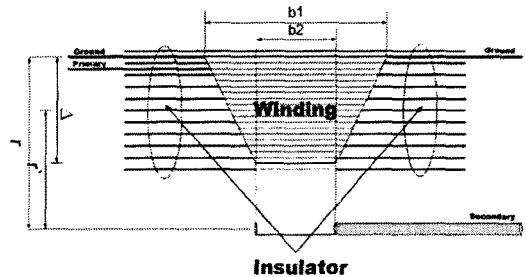


그림 1 원통형 단권 테이퍼형 권선으로 된 공심 자동 변압기의 구조

##### 2.2.2 변압기 설계

그림 1에서 b1과 b2는 테이퍼 모양으로 된 권선의 가장 넓은 폭 및 가장 좁은 폭이다. 그리고 r과 r'는 변압기의 반경 및 권선의 평균 반경이다. 그리고  $\Delta$ 는 권선의 두께이다. 변압기 권선에서의 전계강화도는 아주 크다. 따라서 적절한 절연 층의 선택에 대한 연구가 필요하다. 전계강화도는 권선의 끝부분의 반경을 커지게 하고 유전상수가 아주 큰 절연지를 이용하여 권선용 동판을 덮으면 줄일 수 있다. 권선용 동판을 덮는 절연지는 주 절연지보다 유전상수가 더 커야 한다. 권선용 동판의 끝을 접지 않았을 경우와 접었을 경우의 전계강화도는 각각 2.5와 1.5이다. 전선의 안전율을 1.5로 하면 권선의 층간 절연은 최소 113[kV](50[kV]  $\times$  1.5  $\times$  1.5)는 되어야 한다. 그림 2는 전계강화도를 줄이기 위한 권선과 절연지의 배치도이다. 표 2는 변압기의 권선 및 절연지의 요약 정리한 것이다. 변압기의 보빈은 MC-nylon을 이용하여 특수하게 설계, 제작 하였다. 그림 3은 변압기를 위한 보

빈 이다. 권선용 동판에서 b1과 b2사이의 차이는 절연지와 권선사이의 양끝 여유를 고려하여 16[cm]로 하였다. 변압기 일차 측의 인덕턴스 요구사항을 만족시키기 위해 b1은 30[cm], b2는 14[cm]로 하였으며 절연의 폭은 70[cm]로 하였다. 따라서 권선과 절연지 끝 사이의 최소 여유 길이는 20[cm]가 된다. 또한 보빈의 양쪽 끝부분에는 전계강도 약화용 공심 링을 설치하였다. 변압기의 일차측 인덕턴스의 설계 값은 179.5[nH]이다.

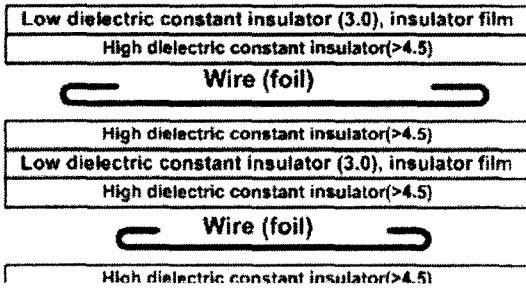


그림 2 전계강도화를 줄이기 위한 권선과 절연지의 최적 배치도

표 2 변압기 권선용 동 및 절연지

wire	copper foil 두께: 0.07[mm]	전류밀도 500 Dcm/A
절연지 (저 유전성수)	Polyester film 두께: 0.075[mm]	$\epsilon_r = 3.0$
절연지 (고 유전성수)	Kraft paper 두께: 0.08[mm]	절연강도: 280[kV/mm] $\epsilon_r = 6.0$

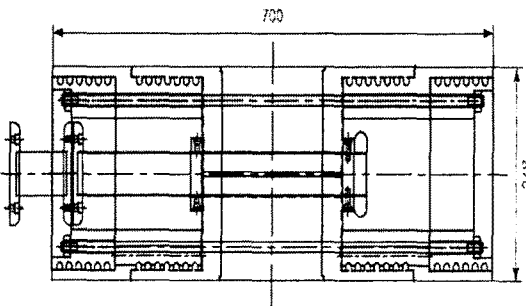


그림 3 변압기의 보빈

## 2.3 변압기 제작 및 시험

### 2.3.1 변압기 제작

변압기는 그림 3의 보빈에 그림 2와 표 2를 이용하여 단권 형으로 15 턴 권선하였다. 저 유전성수 절연지는 폭을 70[cm]로 하고 고 유전성수 절연지는 폭을 45[cm]로 하였다. 권선용 동판은 일차측이 30[cm]이고 이차측이 14[cm]이다. 그림 4는 테이퍼 형태의 동판 및 절연지를 펼친 모양이다. 동판의 끝은 끝부분의 날카로운 면을 없애며 끝에서의 곡률 반경이 길어지게 하여 전계강도를 줄이도록 접었다. 일차와 접지의 리드 인출은 동판으로 하였으며 이차측 리드인출은 동 파이프프로 하였다. 그림 5는 제작된 수백 kV 공심 고전압 펄스변압기의 사진이다. 변압기의 인덕턴스는 일차측이 200[nH], 이차측

이 36.5[μH]로 측정되었다. 일차 측 인덕턴스가 설계값보다 약간 높은 것은 보빈의 양쪽 끝부분의 전계강도 약화용 공심 링 때문이다.

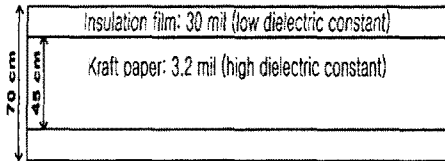
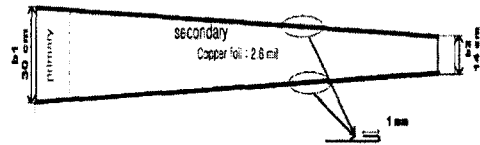


그림 4 테이퍼 형태로 된 동판 및 절연지의 펼친 모양

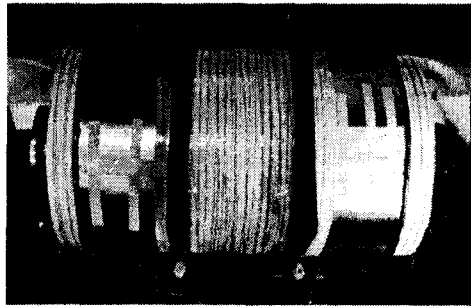


그림 5 공심 형 고전압 펄스변압기 제작사진

### 2.3.2 변압기 시험

그림 6은 변압기의 턴수 비 측정 회로이다. 회로에서 TVS 스위치가 개방되어있는 동안 캐패시터에 고전압을 충전하고 TVS가 단락되면 캐패시터의 에너지가 TVS를 지나 변압기의 일차측으로 인가된다. 이때 변압기의 이차에서는 턴수비 만큼 승압된 고전압이 발생한다. 일차측으로 공급된 전압은 21.7[kV]이고 이차측에서 출력된 고전압은 245.5[kV]이다. 따라서 변압기의 턴수비는 11.3이다. 그림 7은 턴수비 측정 결과이다.

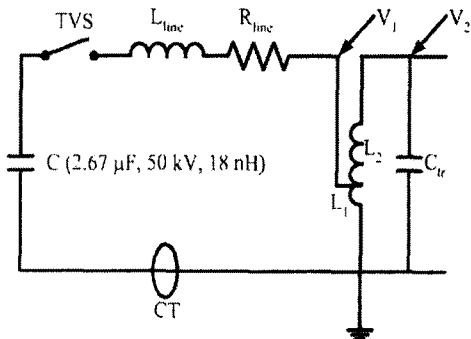


그림 6 변압기의 턴수비 측정회로

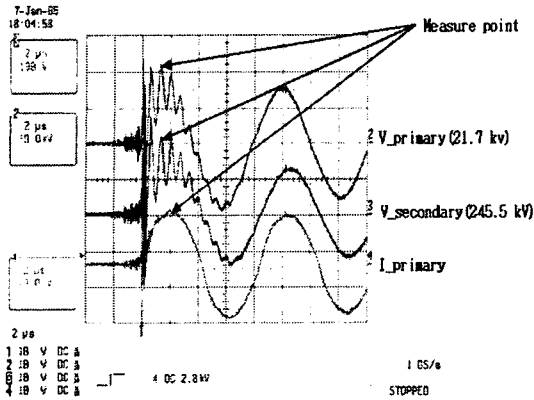


그림 7 변압기의 턴수비 측정 결과

변압기의 절연 내력 시험은 막스-제네레이터를 이용하여 변압기의 접지와 이차권선 즉 변압기 권선 전체에 고전압 펄스를 인가하여 시험하였다. 이차측에 인가한 고전압의 측정은 1000:1 고전압 플로브를 이용하였다. 변압기의 절연내력은 400[kV]까지 측정되었다. 그림 8은 변압기의 절연내력 시험 결과이다.

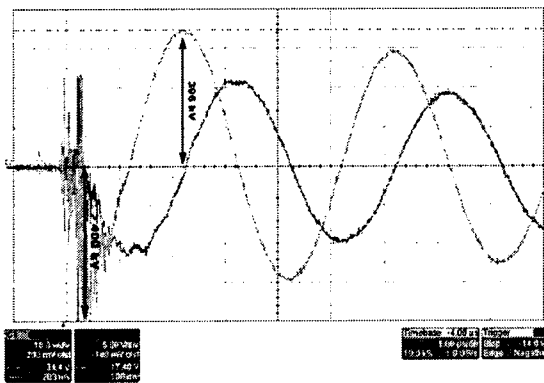


그림 8 변압기 절연내력 시험결과

### 3. 결 론

공심형 고전압 펄스 변압기를 설계 및 제작하였다. 개발된 변압기의 크기는 직경 28[cm], 길이 70[cm]이다. 이변압기의 부피는 43,100[cm<sup>3</sup>]이다. 개발된 변압기는 턴수비가 11.3이며 400[kV]까지 절연내력 시험을 하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] P. D'A. Champney, C. Eichenberger, Explosively Driven 1 MV Output Air-core Pulse Transformer Design, Final Report PSI-FR-3358-01, 1988
- [2] James P. O'Loughlin, "Air Core Pulse Transformer Design", Power Modulator Conference 1988, pp325-330
- [3] S. T. Ko, and S. H. Nam, "Numerical field analysis for an air cored spiral strip type pulse transformer", 2004 Power Modulator Conference, May. 23-26, 2004, San francisco, CA, USA.
- [4] G. J. Rohwein, "A Low Impedance High-Voltage Direct Drive Transformer System", 1988 IEEE Power

Modulator Symposium proceeding, pp. 331-335

[5] P. M. Ranon, etc, "Modular design of a 100 GW, 10 kJ, Charge Dielectric Line Driven Pulsed Transformer", 1988 IEEE Power Modulator Symposium proceeding, pp. 62-70