

고전압 대전류용 TVS(Triggered Vacuum Switch) 특성 시험

박성수, 남상훈, 김상희, 한영진, 허훈, 김승환, 박용정, 홍만수
포항공과대학교 가속기 연구소

Characteristic Tests of High Voltage High Current TVS(Triggered Vacuum Switch)

S.S. Park, S.H. Nam, S.H. Kim, Y.J. Han, H. Heo, S.H. Kim, Y. J. Park, M.S. Hong
Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH

Abstract - 가속기 연구소에서 개발한 고전압 대전류용 Seal-off TVS (Triggered Vacuum Switch)의 특성을 시험 하는 것을 목적으로 하고 있다. 제작한 TVS는 양전극과 음전극이 교대로 고정된 간격으로 각각 3개의 전극으로 배열되어 있으며 전극은 사다리꼴 모양으로 되어있고 트리거 시스템과 개스를 흡수하는 게터가 내부에 설치되어 있다. 제작한 스위치 내부는 약 10^{-7} torr의 진공상태를 유지하고 있으며 세라믹 챔버를 사용하여 Seal-off 상태로 설계, 제작하였다. 스위치 시험장치는 200 μ F, 22 kV 6개를 병렬로 연결한 커패시터뱅크와 20 μ H ~ 160 μ H의 탭변환 인덕터와 0.1 Ω ~ 0.5 Ω 의 저항을 이용하여 시험 장치를 구성하였다. TVS의 시험에서 에너지 최고 전달량은 74 C 이었으며 이때 인가전압은 30 kV, 최대 전류는 100 kA, 펄스폭은 1~2 ms이었다. 본 논문은 제작한 스위치의 전기적인 특성 시험한 결과에 대하여 논하고자 한다.

상태에서 밀봉(Seal-off)을 하여 시제품 TVS를 제작하였다.[5], [6]

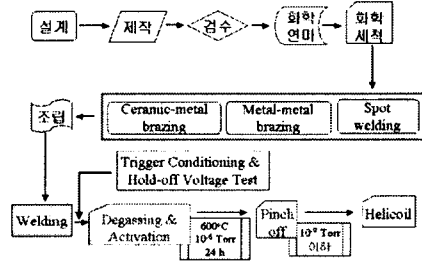


그림 1. 시제품 TVS 제작 공정

1. 서 론

고전압 대전류 시스템에 사용하는 스위치의 기본 요구 조건은 저가, 긴 수명, 적은 지터와 대용량 그리고 seal-off 형태로 쉽게 설치하여 운전하는 것이다.[1],[2],[4] 포항공과대학교 연구소에서 고전압 대전류 스위치 용 TVS를 개발하였으며 개발한 TVS 시제품을 가지고 스위치의 기본적인 시험과 TVS에 나타나는 특성을 시험하였다. TVS의 시험 장치는 커패시터뱅크 100 kJ과 300 kJ을 사용하였으며 각각의 시험장치에서 요구조건에 맞는 전기적인 시험을 하였다. 100 kJ의 시험장치에서는 스위칭 최대 전압을 인가하여 스위치 도통 시험을 하였으며 인덕턴스와 저항 부하를 여러 값으로 조합해서 TVS에 나타나는 다이오드 현상에 대한 시험을 하였다. 그리고 300 kJ 에서는 크로마 회로를 설치하여 인덕터를 부하로 사용하여 스위치를 이용한 최대 에너지 전달 시험을 하였다. 시험한 TVS의 최대 인가전압은 30 kV, 최대 전류는 100 kA 이상, 펄스폭은 1.5 ms, 최대 전하 전달량 74 coulomb이었다.

그림 2는 스위치 설계도면이고 위쪽은 Anode 이고 아래쪽은 Cathode 이며 트리거 핀을 포함하고 있으며 중간은 세라믹 챔버로 Anode와 Cathode를 절연해주고 있다. 그리고 캐소드와 트리거 부분도 세라믹 피드쓰루로 절연을 하고 있다. TVS의 내부는 진공으로 유지되며 진공도는 10^{-7} torr 정도를 유지하고 있다. 그림 3은 연구소에서 동전극을 사용하여 제작한 시제품 스위치 사진이다.

2. 본 론

2.1 스위치 설계 및 제작

시제품 TVS 제작공정은 그림 1과 같다. 시제품 TVS 제작은 스위치를 설계하고 스위치 각 부품을 가공하였으며 가공시 묻은 이물질 제거 및 거친 부분을 매끄럽게 처리하는 화학 연마 및 화학 세정의 과정을 통하여 이중 접합하기 전까지의 제작 준비 과정을 마친다. 그리고 각 부품별로 이중접합을 하고 접합이 끝나면 조립 과정으로 접합된 부품을 조립하면 1차 제작공정은 완료된다. 그리고 내부 진공 누설 시험으로 누설 여부를 판단하고 트리거 길들이기(Conditioning)를 통하여 트리거 조건을 갖춘 후 탈개스 노(Degassing Furnace)에서 스위치 내부에 있는 게터(Getter)의 활성화(Activation)와 개스 제거 과정을 거쳐서 스위치 내부가 진공으로 유지한

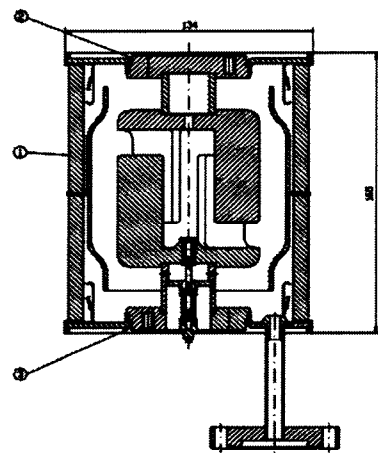


그림 2. TVS 설계 도면.(1) 세라믹 챔버, (2) Anode, (3) Cathode

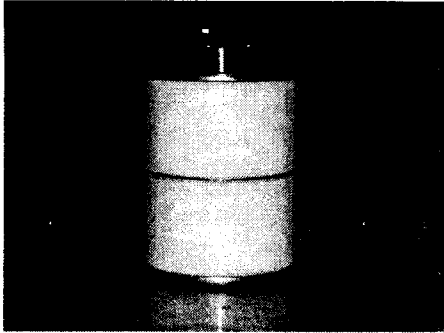


그림 3. 동전극으로 제작한 TVS 시제품

2.2 스위치 시험

2.2.1 스위치의 100 kJ 시험

100 kJ 시험장치는 50 kV, 160 mA 고전압 전원공급 장치로부터 100 kΩ의 저항을 통하여 100 kJ의 저장용 커패시터에 에너지를 저장하며, 저장용 커패시터는 50 μF, 44 kV 2개를 병렬로 연결하여 사용하였으며 부하로 5 ~ 20 μH의 인덕터를 사용하여 시험장치를 구성하였다. 시험장치에 스위치를 설치한 후 설치된 TVS에 트리거를 인가하여 시제품의 전기적인 시험을 하였다. 제작된 TVS 시제품은 1차로 40 kV 까지 Hold-off 시험을 하였으며 이상이 없었으며 제작시 남아있는 작은 돌기들을 제거하기 위하여 고전압 킬들이기를 30 kV에서 40 kV 까지 약 2시간 정도 수행하였다. 그림 4는 스위치 시험 장치에 시제품 TVS를 설치하여 시험하여 얻은 전압, 전류 시험 파형이다. 고전압 전원공급장치를 사용하여 커패시터 뱅크에 전압을 30 kV까지 충전하여 시제품 TVS를 시험하였으며, 이때의 스위치를 통하여 흐른 전류는 최대 90 kA이었으며, 펄스의 반주기폭은 약 105 μs 정도 이었다. 이때 전달된 총 전하 전달량은 다음과 같은 식으로 구할 수 있으며, 전압(V)는 30 kV, 충전 커패시턴스(C)는 100 μF, 최대 전류(I_{max})는 90 kA, 2차 전류(I₁)은 83 kA로 주어지며 주어진 값으로 계산한 총 전하 전달량 q는 약 74 C 이었다.

$$\text{총전하 전달량, } q = CV \frac{1 + \frac{I_1}{I_{\max}}}{1 - \frac{I_1}{I_{\max}}}$$

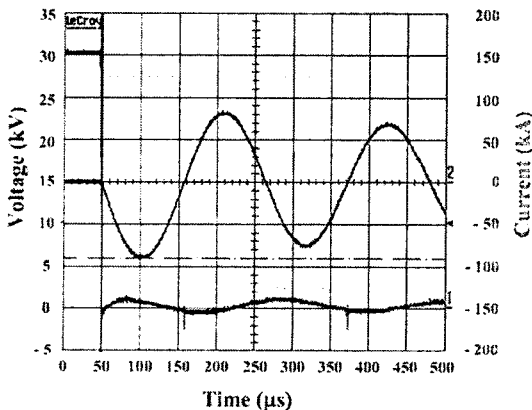


그림 4. 100 kJ에서 시험 파형(CH1 30 kV, CH2 90 kA, Half cycle 105 μs)

2.2.2 300 kJ 커패시터 뱅크

시제품을 사용하여 긴펄스 시험을 하기 위하여 300 kJ의 회로를 그림 5와 같이 구성하였다. 300 kJ 시험장치는 40 kV, 160 mA 고전압 전원공급장치로부터 50 kΩ의 저항을 통하여 300 kJ의 저장용 커패시터에 에너지를 저장하며, 저장용 커패시터는 206 μF, 22 kV 6개를 병렬로 연결하여 사용하였으며 부하로 20 ~ 160 μH의 인덕터와 0 ~ 0.2 Ω를 사용하여 시험장치를 구성하였다. 그리고 커패시터의 역전압 충전 방식을 위하여 커패시터와 병렬로 Crowbar 회로를 삽입하여 시험을 하였다. 측정장비로는 1000:1의 고전압 분배기와 0.001 V/A의 전류 트랜스퍼머를 사용하여 각각의 전압과 흐르는 전류를 측정하였다.

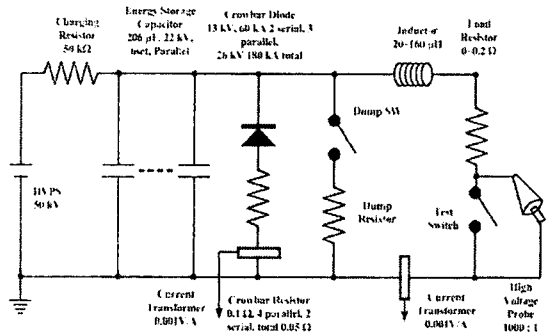


그림 5. Crowbar 회로를 포함한 300 kJ 시험 회로

그림 6은 300 kJ 스위치 시험 장치에서 시제품 TVS를 시험하여 얻은 충전 커패시터 전압과 스위치에 흐르는 전류 파형이다. 회로에 부하로 인덕턴스 20 μH를 사용하였으며 고전압 20 kV를 인가하여 스위칭하였을때 스위치에 흐르는 최대 전류는 약 109 kA이었으며 펄스 폭은 약 1.5 ms이었다. 그리고 이때 스위치를 통하여 전달된 총 전하 전달량은 약 75 C 이었다.

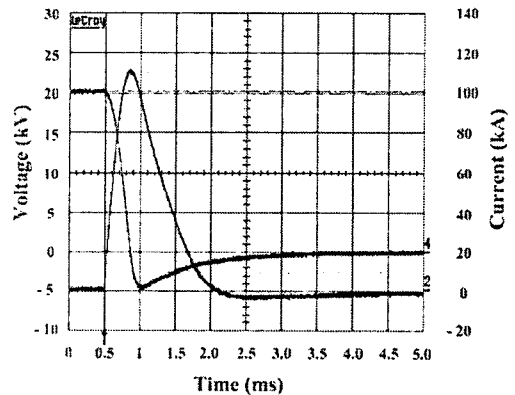


그림 6. 20 μH의 부하에서 시험한 파형(CH4, capacitor charging voltage 20 kV, CH2, switching current 109 kApeak)

표 1은 제작한 스위치를 100 kJ과 300 kJ에서 시험한 내용을 정리하였다. 시험한 내용은 각각의 인덕턴스를 바꾸면서 시험을 하였을 때의 전압과 전류 그리고 펄스 폭등을 정리하였으며 특히 진공스위치에서 발생하는 정류현상에 가장 많은 영향이 있는 di/dt의 값을 구하였으며 스위치가 스위칭시 에너지를 전달하는 전하량을 구하여 정리하였다.

표 1. 제작한 TVS의 시험 결과 요약

Parameter	unit	Test Result				
		100 kJ		300 kJ		
Cap.bank						
Inductance	$\mu\text{H}/\Omega$	10/0	10/0	0.0/125	80/0.25	20/0
Resistor						
Voltage	kV	20	30	20	20	20
Current	kA	63	90	52	42	109
Half	ms	0.1	0.1	0.08	1.2	1.5
Period						
Coulomb	C	3	74	2	25	75
di/dt	kA/ μs	1.5	1.8	1.3	0.1	0.2
Diode						
Phenom.	Non	Non	Non	Ok	Ok	

2.2.3 TVS 특성조사

TVS에 나타나는 다이오드 현상은 100 kJ의 커패시터 저장장치를 이용하여 시험을 하였다. 부하로는 20 μH 의 인덕터를 사용하였으며 그림 7에 다이오드 현상파형을 보였으며 12 kV를 인가하였을 때 28 kApeak를 나타내었다.

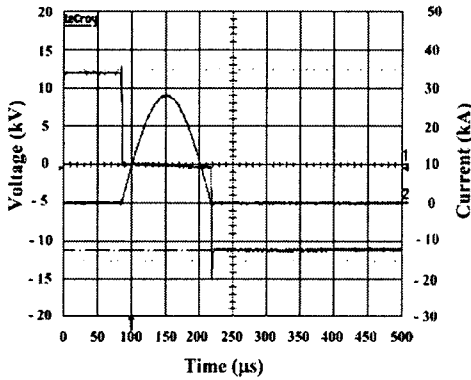


그림 8. 스위치의 다이오드 현상 파형

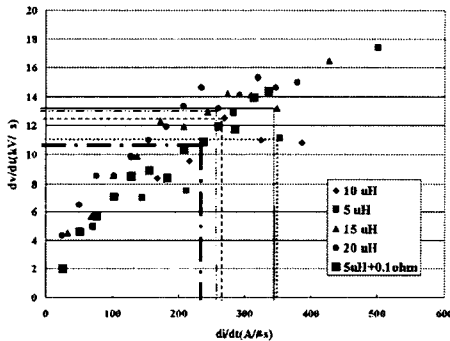


그림 9. di/dt 대 역전압 dv/dt 그래프

그림 9는 부하에 따른 다이오드 현상에 대한 시험데이터를 그래프로 나타내었다. 부하는 인덕턴스와 저항을 직병렬로 조합하여 시험을 하였다. 5 μH 인덕터와 0.1 Ω 저항을 부하로 사용했을 경우 약 50 회 시험한 결과 정류 현상이 약 96 % 발생하는 조건에서 역전압 및 전류 상승속도는 각각 10.8 kV/ μs 와 236 A/ μs 이었다. 저항 부하 없이 10 μH 인덕터를 부하로 사용했을 경우 약 25 회 시험한 결과 정류 현상이 약 100 % 발생 하는 조건에서 역전압 및 전류 상승속도는 각각 12.5 kV/ μs 와 268

A/ μs 이었다. 저항 부하 없이 5 μH 인덕터를 부하로 사용했을 경우 약 25 회 시험한 결과 정류 현상이 약 100 % 발생 하는 조건에서 역전압 및 전류 상승속도는 각각 11.1 kV/ μs 와 352 A/ μs 이었다. 저항 부하 없이 15 μH 인덕터를 부하로 사용했을 경우 약 50 회 시험한 결과 정류 현상이 약 100 % 발생 하는 조건에서 역전압 및 전류 상승속도는 각각 13.3 kV/ μs 와 344 A/ μs 이었다. 저항 부하 없이 20 μH 인덕터를 부하로 사용했을 경우 약 50 회 시험한 결과 정류 현상이 약 100 % 발생 하는 조건에서 역전압 및 전류 상승속도는 각각 13.2 kV/ μs 와 257 A/ μs 이었다.

3. 결 론

TVS를 설계 및 제작 공정을 거쳐 시제품을 제작하였다. 이러한 제작공정을 거쳐 제작된 시제품을 100 kJ과 300 kJ의 커패시터뱅크에 설치하여 각각 전기적인 특성 시험을 하였다. 100 kJ의 커패시터뱅크에서는 30 kV를 인가하여 부하와 인덕턴스를 변화시키면서 시험을 하였으며 10 μH 의 인덕턴스에서 약 90 kA의 침투전류와 105 μs 의 펄스 폭을 얻었으며 이때의 총 에너지 전달량은 74 C이었다. 그리고 300 kJ의 커패시터뱅크에서는 20 kV를 인가하여 20 μH 의 인덕턴스를 사용하여 시험하였을 경우 침투전류 109 kA, 1.5 ms의 펄스 폭을 얻었으며 이때의 에너지는 전달량은 75 C이었다. 그리고 TVS의 다이오드 현상은 여러 조건의 부하를 사용하여 측정한 결과 다이오드 현상이 96 %이상 발생하는 경우에 스위치에 인가되는 역전압과 전류 상승속도는 각각 10.8 kV/ μs 와 236 A/ μs 이하 이었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y. G. Chen, R. Dethlefsen, R. Crumley, "High Coulomb Triggered Vacuum Switch", 9th IEEE Int. Pulsed Power Conf. 1993, pp 938-941
- [2] J. A. Pappas, S. P. Pish, and M. J. Salinas, "Characterization of Triggered Vacuum Switches for High Current Operation," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 35, No. 1, pp 367-371, January 1999.
- [3] R. Dethlefsen, V. A. Sidorov, V. A. Vozdvijenskii, "Triggered Vacuum Switch Testing for Millisec Pulses," 8th *IEEE Int. Pulsed Power Conf.*, San Diego, California, pp 511-514, June 16-19, 1991.
- [4] Raymond L. Boxman, Philip J. Martin, and David M. Sanders, "Handbook of Vacuum Arc Science and Technology" chapter 7, pp552-589, 1995.
- [5] S. S. Park, Y. J. Han, S. H. Kim, Y. K. Kwon, Sung Han Kim, Y. J. Park, S. H. Nam, J. W. Jung, J. S. Kim, J. H. Chu, G. Y. Sung, "Development of a Triggered Vacuum Switch for a ETC Gun System," 14th *IEEE Int. Pulsed Power Conf.*, Dallas, Texas, pp 1367-1370, June 15-18, 2000.
- [6] S. S. Park, Y. J. Han, S. H. Kim, Sung Han Kim, Y. J. Park, S. H. Nam, H. Hoon, B. H. Son "Development of A 75 Coulomb Triggered Vacuum Switch," *IEEE Int. Power Modulator Conf.*, San Fransisco, CA, May 23-26, 2004.