

고전압 대전류용 Seal-off TVS(Triggered Vacuum Switch) 연구

박성수*, 한영진, 김상희, 권영건, 김승환, 박용정, 홍만수, 남상훈
포항공과대학교 포항가속기연구소 가속기부

Study of Seal-off Triggered Vacuum Switch(TVS) for High Voltage and High Current

S.S.Park*, Y.J.Han, S.H.Kim, Y.K.Kwon, S.H.Kim, Y.J.Park, M.S.Hong, S.H.Nam
Accelerator department, Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH

Abstract - The purpose of this experiment was to develop Triggered Vacuum Switch(TVS) for the high voltage and high current. The TVS has an array of rods of alternate polarity in which a fixed gap spacing is maintained between the rods. The cross section of each rod has trapezoidal shape. It consists of electrode, ceramic chamber, getter and trigger. Currently, triggered vacuum switch(TVS) with seal-off has been designed and fabricated at PAL. An experimentation and trigger devices for TVS were designed for testing characteristics of electricity. For making the prototype of TVS, it is developed of fabrication process and fined of electrode material. The fabrication of the TVS is a lot of process which have manufacturing of part, chemical clean, ceramic brazing and metal welding. The fabricated TVS is tested of leak for vacuum, hold-off voltage and conditioning of trigger system. The TVS has pinch-off after it is removed of gas in the TVS and activated of getter in degassing furnace. The prototype TVS tested about 20 kV, 75 kA, 83 μ s with 100 kJ capacitor bank and inductance 5 μ H. This paper describes the results of tests and the characteristics of the switch

하여 이중 집합하기 전까지의 제작 준비 과정을 마친다. 그리고 각 부품별로 이중집합을 하고 집합이 끝나면 조립 과정으로 집합된 부품을 조립하면 1차 제작공정은 완료된다. 그리고 내부 진공 누설 시험으로 누설 여부를 판단하고 트리거 길들이기(Conditioning)를 통하여 트리거 조건을 갖춘 후 탈가스 노(Degassing Furnace)에서 스위치 내부에 있는 게터(Getter)의 활성화(Activation)와 개스 제거 과정을 거쳐서 스위치 내부가 진공으로 유지한 상태에서 밀봉(Seal-off)을 진행한 다.

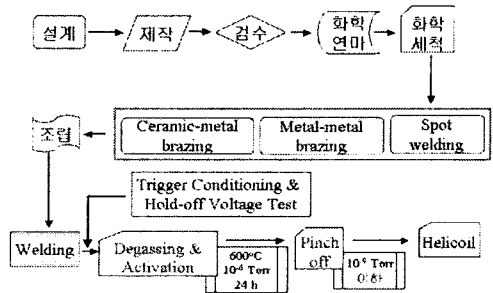


그림 1 시제품 TVS 제작 공정

1. 서 론

진공 아크를 매개체로 하는 전형적인 대 전력용 고전압 스위치의 형태는 진공 상태에서 두 평판을 맞댄 전극 형태인데 이런 구조는 높은 전류 상태에서 스위치 작동시 발생하는 자체 유도 자기장에 의해 방전전류가 전극 표면의 좁은 지역에서 압축되어 높은 전류밀도를 유도해서 급속한 전극의 손실을 가져오게 된다. 러시아 과학자들에 의해 개발되어 동작전압 30kV에서 200kA의 peak current까지 사용 가능하게 되었다. 또한 스위치 자체의 정류 작용이 탁월하여 전류감소율 ($-di/dt$)이 300 A/ μ s 이하일 경우 100%의 정류 작용을 보이게 되었다. 본 실험은 포항가속기연구소에서 대전력 펄스형 스위치 개발 중에 수행된 것으로 TVS의 제조 및 전극 물질의 개발과 진공 스위치의 제작 과정 그리고 스위치를 제작하여 전기적인 특성을 시험하였다.

2. 본 론

2.1. 시제품 TVS 제작

TVS 방전원리를 기초로 하여 시제품 TVS를 설계, 제작하였다. TVS의 제작공정은 그림 1와 같다. 시제품 TVS 제작 과정은 스위치를 설계하고 스위치 각 부품을 가공하였으며 가공시 묻은 이물질 제거 및 거친 부분을 매끄럽게 처리하는 화학 연마 및 화학 세정의 과정을 통

2.1.1. TVS 설계, 부품 가공, 화학 연마 (Polishing), 세척

포항 가속기 연구소에서 시제품 TVS를 제작하기 위하여 설계한 스위치 챔버의 크기는 $\phi 134$ cm \times 165 cm이고 이중 금속과 집합하기 위하여 세라믹 챔버의 위쪽과 아래쪽이 금속처리(Metalizing)되어 있다. 전극의 양극과 음극은 사다리꼴 기둥 모양이 3개씩 구성되어 있으며 양극과 음극이 서로 교번하는 형태를 이루고 있으며 전극 사이의 간격은 9.6 mm이고 위 부분의 간격은 15 mm이다. 세라믹 챔버는 2개로 나누어져 있으며 중간에 내부의 아크에 의하여 발생한 금속 증기(Vapor) 및 미세 입자가 세라믹에 코팅되는 것을 막기 위한 금속 차폐(Shield)가 붙어있으며 세라믹과 금속을 이중 집합한다. 그리고 양극과 음극이 있으며 내부가 진공 상태를 유지하기 위하여 개스를 제거하는 게터(Getter)를 설치되도록 설계하며 밀 부분에 있는 펌핑 포트는 TVS 스위치를 밀봉(Seal-off) 할 때 필요한 부분으로 동파이프로 되어있으며 진공으로 펌핑한 상태에서 이 부분의 중간을 잘라내기(Pinch-off)를 하여 스위치를 밀봉(Seal-off) 하도록 설계하였다. 설계한 스위치 부품을 가공 후 화학 연마를 한 후 화학 세척을 통하여 내부의 오염 물질과 날카로운 부분을 제거하는 과정을 거친다. 기계 가공은 표면이 거칠기 때문에 사포로

연마(Polishing)를 한 후, 화학 세정과정을 거친다. 화학 세정은 황산 수용액(H₂O₂ 750 ml, H₂SO₄ 15 ml, Bright dip 30 ml and H₂O 3000 ml)에 약 35°C에서 3 시간 가량 화학적 연마(Polishing)를 한다. 그리고 이 과정 후 화학 세척인 아세톤과 에탄올, 그리고, 증류수에서 각각 10분씩 초음파 세척을 한 다음 90 °C 건조기에서 건조시켜서 TVS를 제작하기 위한 준비를 한다.

2.1.2 TVS 집합 및 용접

시제품 TVS를 제작하기 위하여 필수 과정인 이중 금속간의 집합과 용접은 많은 장비와 숙련된 기술자가 필요하다. TVS의 내부를 진공으로 유지하면서 스위칭 동작을 할 수 있도록 만들기 위하여 전극으로 사용하는 금속과 절연체로 사용하는 세라믹을 접합하기 위한 기술이 접합 기술이며 여기에 사용하는 장비는 진공 노(Vacuum Furnace)이며 접합 시험과 금속과 금속의 용접에 대한 연구를 병행하였다. 그림 2는 진공 노에서의 이중접합 사진이다.

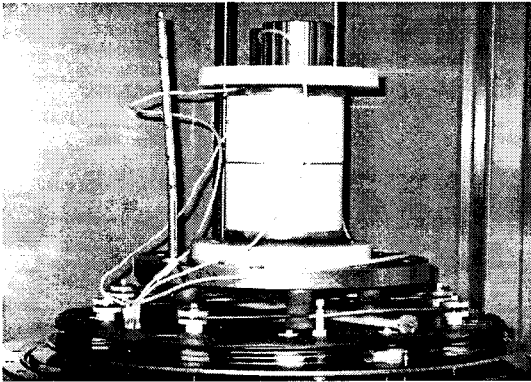


그림 2 세라믹 챔버와 금속을 접합하기 위하여 노 내부에 설치한 사진

금속처리된 세라믹 챔버와 열 팽창율이 비슷한 코바와 이중 집합을 한 세라믹 챔버와 플랜지인 스테인레스와 동인 양극과 음극 전극을 접합한 사진이다. 세라믹 챔버의 안쪽은 스위칭시 발생하는 금속 증기(Vapor)가 세라믹에 코팅되는 것을 막아주는 동 차폐(Shield)가 세라믹과 접합되어있다. 그리고 음극 전극에는 밀봉(Seal-off)시 절단하기(Pinch off) 위한 동 파이프로 된 진공포트가 있으며 전극의 양쪽아래에 가스 제거용 게터(Getter)를 점 용접(spot welding)하여 접합한 후 동종의 금속접합을 하였다.

2.1.3. TVS 누설 시험 및 Hold-off 전압 검사와 트리거 길들이기

코바와 스테인레스를 용접한 후 그림 3과 같이 진공 펌핑용 포트를 연결하여 스위치의 진공 누설 시험을 하였다. 진공 누설 시험은 10⁻¹⁰ Torr L/sec이하로 양호한 상태를 얻었다. 진공 누설 시험 후에 스위치의 사용 전압이 20 kV이기 때문에 약 40 kV까지 Hold-off 검사를 하였다. Hold-off 전압을 검사하기 위하여 진공 펌프(TMP, MN cff 450 turbo)로 10⁻⁶ Torr 까지 펌핑을 한 상태에서 스위치의 양극과 음극에 50 kV 전원 공급장치로 20 MΩ의 저항을 통하여 전압 인가시험을 하였다. 그리고 Hold-off 검사 후에 시제품 TVS의 트리거 길들이기(Conditioning)를 하였다. 트리거 길들이

기는 양극과 음극에 9 μF의 커패시터를 통하여 약 5 ~ 10 kV의 전압을 인가한 상태에서 트리거에 트리거 펄스를 인가하여 주 스위치의 스위칭시 발생하는 전극 금속 증기(Vapor)가 트리거 절연체의 세라믹에 낮은 전압에서 트리거가 잘 발생할 수 있도록 코팅을 하는 과정이다. 트리거 길들이기는 트리거 전극과 음극 사이의 절연 저항을 측정하여 수백 kΩ ~ 수 MΩ이면 적당히 트리거 절연체에 코팅이 된 것으로 판단을 할 수 있고 약 5 kV에서 트리거 성공률이 높다. 트리거 길들이기는 위와 같은 조건으로 약 100 ~ 200회 정도 하면 적당하다.

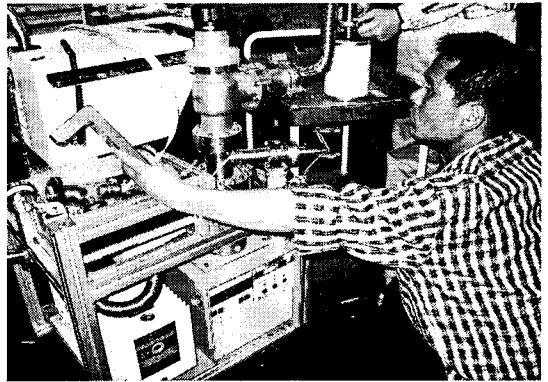


그림 3 TVS용 세라믹 챔버 이중접합 및 금속용접 후 진공 누설 검사

2.1.4. 밀봉(Seal-off)을 위한 게터(Getter)와 밀봉(Seal-off)

밀봉(Seal-off)을 하기 위하여 사용하는 게터(Getter)는 스위치 챔버 내부에서 발생하는 가스를 흡착하는 소자로서 많이 사용하고 있다. 게터(Getter)는 비증발(Non-evaporable)형과 증발(Evaporable)형이 있으며 활성은 게터를 승화하여 용기에 흡착시키는 방법으로 가스를 흡수하므로 매우 불편하다. 반면에 비증발형은 실온에서도 가스를 흡착할 수 있으며 상용 제품으로 구입이 가능하다. 밀봉을 하기 위하여 사용하는 비증발형 게터는 St 707, St 101, St 171의 종류가 있으며 St 707은 상온에서 펌핑이 가능하며 구성 비율은 Zr = 70 %, V = 24.6 %, Fe = 5.4 %로 되어있으며 낮은 온도에서 활성화가 가능하다. 그리고 St 101은 비교적 높은 온도에서 펌핑을 해야하며 구성 비율은 Zr = 84 %, Al = 16 %로 되어있고 높은 온도에서 활성화가 가능하다. St 171은 좁은 면적에서 사용하는 것으로 기공이 많은 것으로 되어있으며 Zr에 탄소가 첨가 되어있고 높은 온도에서 활성화가 가능하다. 그림 4는 비증발형 게터 인 St 101이 상용화 된 제품의 그림이다.

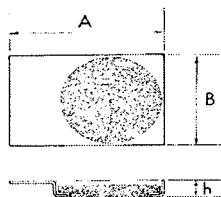


그림 4 비증발형 게터 인 St 101 사진

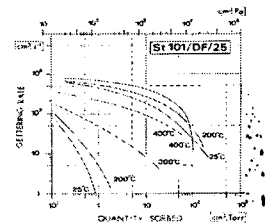


그림 5 비증발형 게터 인 St 101 특성곡선

그림 4에서 노출 활동 표면(Exposed Active Surface)은 25 mm^2 이고 내용물(Content)은 50 mg. 면적에서 A는 8 mm 이고 B는 5.6 mm 이며, h는 1.0 mm이다. 그림 5는 비증발형 게터(Non-evaporable Getter)인 St 101의 특성곡선이다. 위의 3개 곡선은 H_2 에 대한 특성곡선이고, 아래 4개 곡선은 CO에 관한 특성 곡선이다. 활성화(Activation)는 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 30초간 가열하여 활성화하고 게터의 일정 압력(Constant Pressure)은 6×10^{-10} Torr 이다. 시험 탈착 속도(Conductance)는 H_2 에서 $60 \text{ cm}^3/\text{s}$ 이 있으며 CO에서 $17 \text{ cm}^3/\text{s}$ 이었다. TVS를 밀봉(Seal-off)하기 위하여 사용하는 탈개스 노에서 게터의 활성화 및 내부의 개스를 제거하기 위하여 탈개스 노에 시제품 TVS를 설치하여 스위치에 내장된 게터의 활성화 및 내부의 개스를 제거한다. 탈개스 노에 TVS를 설치 한 후 상온에서부터 약 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 온도를 상승 시켜서 약 10시간 정도 유지하면서 펌핑을 계속하여 내부의 개스 및 게터의 활성화를 시킨 후 서서히 온도를 내린다. 온도가 상온으로 된 상태의 스위치 내부 진공도는 10^{-9} Torr를 유지하고 있으며 이 진공도를 계속 유지한 상태에서 스위치의 동판으로 된 부분을 잘라내기(Pinch-off)하면 스위치 내부는 약 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ Torr 이상의 진공상태를 유지하게 된다. 그림 6은 TVS를 잘라내기하기 전의 탈개스 노에 설치되어있는 사진이다.

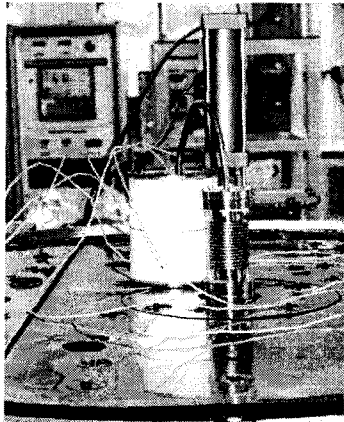


그림 6 게터 활성화를 위하여 탈개스 노에 설치한 TVS

2.2 제품 시험 및 결과

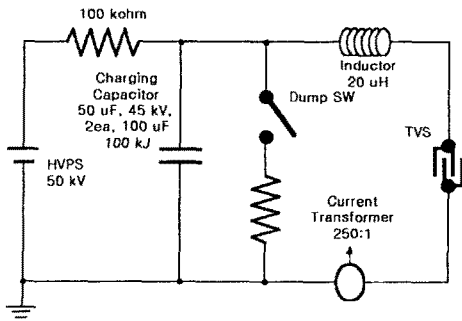


그림 7 시제품 시험용 100 kJ 시험 회로

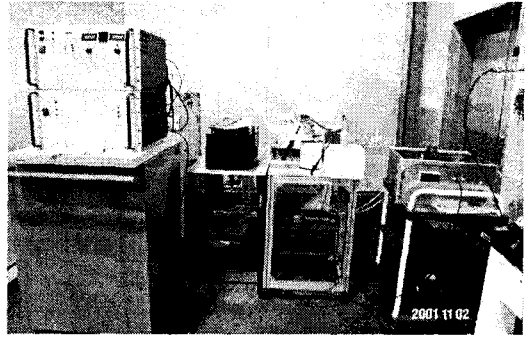


그림 8 TVS를 시험을 위한 100 kJ 시험 장치

시제품을 시험하기 위하여 100 kJ의 회로를 그림 7과 같이 구성하였다. 50 kV, 160 mA 고전압 전원공급장치로부터 $100 \text{ k}\Omega$ 의 저항을 통하여 $100 \mu\text{F}$ 의 저장용 커패시터에 에너지를 저장 한 후 설치된 TVS에 트리거를 인가하여 시제품의 전기적인 시험을 하였다. 제작된 TVS 시제품은 1차로 40 kV 까지 Hold-off 시험을 하였으며 이상이 없었다. 그림 8은 시제품 TVS를 시험하기 위하여 제작된 100 kJ의 시험 장치 사진이다. 왼쪽에 고전압 전원공급장치가 있고 가운데 TVS 스위치와 인덕터($5 \mu\text{H} \sim 20 \mu\text{H}$)가 있고 뒤쪽에 충전용 $100 \mu\text{F}$ 커패시터가 있고 오른쪽에 트리거 펄스 발생기가 설치되어있다.

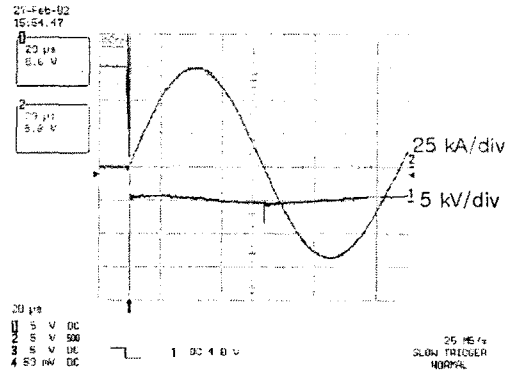


그림 9 TVS 시험, 100 kJ, $5 \mu\text{H}$

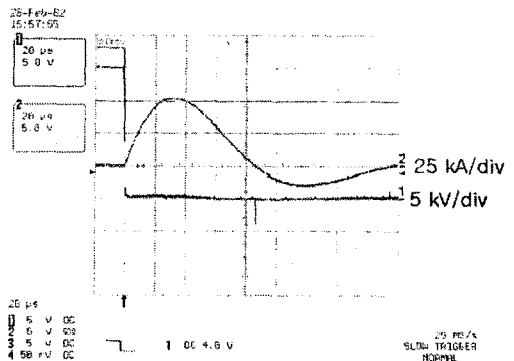


그림 10 TVS 시험, 100 kJ, 0.15Ω , $10 \mu\text{H}$

그림 9는 100 kJ에 TVS를 설치하여 시험한 시험 파

형이다. 인덕턴스 5 μH 를 사용하여 시험하였으며 20 kV를 인가하여 최대 전류 약 75 kA, 펄스폭 약 80 μs 를 얻었다. 그림 10은 인덕턴스 10 μH 와 저항 0.15 Ω 를 사용하여 시험하였으며 20 kV를 인가하여 최대 전류 약 53 kA, 펄스폭 약 80 μs 를 얻었다. 여기에서 di/dt는 각각 20 kV를 인가하였을 경우 인덕턴스 10 μH 와 저항 0.15 Ω 일 때 최대 전류 50 kA에서 1260 A/ μs , 인덕턴스 5 μH 에서 1750 A/ μs , 인덕턴스 10 μH 에서 1260 A/ μs 를 얻었다.

3. 결론

본 실험은 동을 사용하여 rod-array 형태의 TVS를 제작하였으며 시제품 제작 공정과 제작 및 시험에 목적을 두고 있다. 시제품 제작 공정은 첫째 스위치 설계 및 기계 가공을 거쳐 세척 및 화학 세정을 한 후 둘째로 이 중간의 접합 및 금속 용접을 하였고 스위치 챔버의 진공 누설 검사와 트리거 길들이기(Conditioning)와 Hold-off 전압을 검사 한 후 셋째로 게터의 활성화 및 챔버의 가스 제거 작업을 거쳐 잘라내기(Pinch-off)를 하는 공정을 시험 완성하였다. 이러한 공정을 거쳐 현재 1대의 시제품을 제작하여 시험 중에 있다. 시제품을 시험하기 위하여 100 kJ의 회로를 구성하여 시험하였다. 인덕턴스 5 μH 에서 20 kV를 인가하여 최대 전류 약 75 kA, 펄스폭 약 80 μs 를 얻었다. 그리고 인덕턴스 10 μH 와 저항 0.15 Ω 에서 20 kV를 인가하여 최대 전류 약 53 kA, 펄스폭 약 80 μs 를 얻었다. 여기에서 di/dt는 각각 20 kV를 인가하였을 경우 인덕턴스 10 μH 와 저항 0.15 Ω 일 때 최대 전류 50 kA에서 1260 A/ μs , 인덕턴스 5 μH 에서 1750 A/ μs , 인덕턴스 10 μH 에서 1260 A/ μs 를 얻었다. 앞으로 2차 시제품을 CuCr의 전극 재료를 사용하여 제작할 예정이며 300 kJ의 시험 장치를 구성하여 시험 할 예정이다.

(참고 문헌)

- [1] Raymond L. Boxman, Philip J. Martin, and David M. Sanders, "Handbook of Vacuum Arc Science and Technology", 1995.
- [2] T. Warren, J. Dickens, A. Neuber, and M. Kristiansen, IEEE Proc. 1999.
- [3] Richard Paying, Delwyn Jones and Arne Bengtson, "Glow Discharge Optical Emission Spectrometry", John Willey & Sons New York, 1997.
- [4] Richard H. Huddleston and Stanley L. Leonard, "Plasma Diagnostic Techniques" Academic Press New York, 1965
- [5] Auciello, "Plasma Diagnostics", Academic Press, New York, 1989