

트리거 진공 스위치 개발

박성수*, 한영진, 이병준, 김상희, 남상훈
 포항공과대학교 포항가속기연구소 가속기부

Development of Triggered Vacuum Switch (TVS)

S.S.Park*, Y.J.Han, B.J.Lee, S.H.Kim, S.H.Nam
 Accelerator department, Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH

Abstract - A TVS(triggered vacuum switch) use in high-power, high-current, and high-frequency conversion and switching circuits. The TVS has a six-gap trapezoidal rod electrode system. The electrode system consists of three cathode and anode rods which are made with OFHC. The trigger unit of the TVS is located at the cathode base center. To obtain a wide variety of characteristics this paper describes the results of tests.

러한 FN 식에서 도출한 그래프에서 갭 간격에 따른 I-V 특성을 얻을 수 있다.

1. 서 론

TVS는 1937년에 고압 전선의 낙뢰 차단기(Lightning arrester)로 A. W. Hull에 의해서 처음 고안되었다. TVS가 다른 대전류 고전압 펄스 스위치와 구별되는 두 가지 동작 특성은 고진공에서 동작하기 때문에, 이용 가능한 전하 전달자가 전자와 전극 물질뿐이라는 점과 스위치 자체의 정류 작용이다. 그래서, 전자(前者)로 오염되지 않은 진공 환경이 요구되며, 후자(後者)로는 역전류에 대한 열려가 없다. 정류 감소율(-dI/dt)이 300 A/μs 이하일 경우에는 100% 정류 작용을 한다. TVS의 동작 메커니즘을 살펴보면, 트리거에서 표면 방전(surface discharge)으로 아크가 발생한 다음, 자기력에 의해 메인 갭(main gap)으로 확장하여, 메인 갭에서 질은 글로 방전을 일으키고, 이것이 발달하여 아크 방전으로 메인 갭을 방전시킨다. 포항 가속기 연구소(PAL)에서 제작한 TVS 스위치의 전극은 6-gap rod로 사다리꼴 형태를 하고 있으며, 갭 간격은 8 mm이고 OFHC로 제작되어, 10⁻⁶ torr에서 실험하여 전기적 특성 및 TVS의 최초 제작국인 러시아 제품과 비교하여 장단점을 분석한 후 스위치의 성능 향상을 위한 검토를 본 논문에서 다루고자 한다.

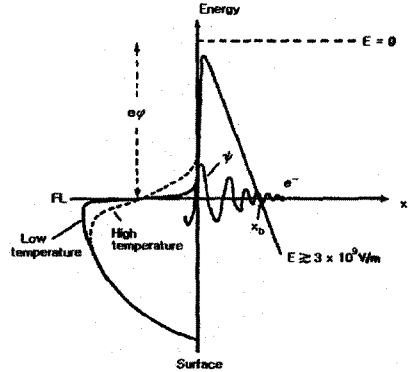


그림 1. 금속 표면에서 전기장 방출된 전자의 양자역학적 터널링 메커니즘

2. 본 론

2.1 TVS의 동작 구성

진공 스위치의 자기방전(self-breakdown) 구성을 먼저 살펴보고, 트리거가 있는 시스템을 다루기로 한다. 자기방전 구성에는 전자 방출로 시작된 것과 미세 입자(microparticle)에 의한 것 두 가지가 있다.

2.1.1 전자 방출로 시작된 방전

전자 방출로 시작된 방전(Metallic field electron emission: M-FEE)은 1928년에 Fowler와 Nordheim이 최초로 이론화했다.[1] 그들은 원자 차원의 깨끗한 금속 표면에 작용하는 높은 외부 전기장 E로 인한 수직 포텐셜 장벽을 그림 1에서 보인것과 같이 투과하는 전자의 양자역학적 터널링으로 설명했다. 방출 전류 밀도 j의 전기장 의존성에 대한 Fowler-Nordheim(F-N)식의 유도는 자유전자 이론에 기초하여 전기장 전자 방출의 전류 밀도를 구할 수 있으며, 이

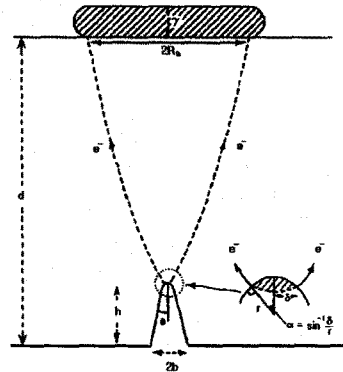


그림 2. 이상적이 전기장 방출 microprotrusion과 반경이 R₀인 양극 hot spot과의 기하학적 관계

그림 2의 미세 돌기 모델에 대해서 고려된 두 가지의 근본적인 메커니즘이 있다. 즉, 음극에서 시작된 방전과 양극에서 시작된 방전이다. 음극에서 시작된 방전은 방출 표면으로 흐르는 전류 I_{OF}에 의한 과도한 주열 히팅(Joule heating)이 미세 돌기 끝 부분을 자발적으로 기화시키는 것이고, 양극에서 시작된 방전은 전자가 포격한 영역(양극의 "hot-spot")의 국소 표면 온도가 전극 물질의 녹는점에 근접하면 일어날 수 있다. 이 형태의 불안정성은 전자빔에서 임계 power loading과 관련된다. 다시 말하면, β > β_C이면 음극에서 시작된 방전이 되고, β < β_C이면 양극에서 시작된 방전이 된다. 이

근 방식에는 두 가지의 단점이 있다. 먼저 높은 방출 전류 밀도에서 공간 전하 효과를 무시한 것이고, 다음으로 돌기 모양을 무시한 것으로 주어진 β 값에 대응하는 넓은 범위의 기하학적 형태가 있을 수 있다. 그래서, chatterton은 컴퓨터 모의 실험을 통해 원뿔형 돌기보다 원통형 돌기가 β_c 의 값이 더 작고, 결국 음극에서 시작된 방전이 일어날 가능성이 높다는 결론을 얻었다. [5]

2.1.2. 미세 입자(microparticle)로 시작된 방전

전극 준비 과정의 피할 수 없는 결과 중의 하나가 동작 전, 전극 표면에 약하게 붙어 있는 미세 입자들을 가진다는 것이다. 예를 들어, 기계적 폴리싱(polishing) 과정에서 연마제의 부분적으로 끼여 있는 불순물 입자나 표면에서 찢긴 섬유 구조의 형태와 조립 과정에서 반대 트 발스 힘에 의해 전극 표면에 붙은 단순한 먼지 등이 있을 수 있는데, 간격이 큰 갭에서는 끼여 있는 불순물과 먼지 입자가 방전에 지배적 역할을 한다. 이와 관련된 최초의 이론은 Cranberg의 "clump" 가설이다. [6] 여기서 clump는 종종 미세 입자(microparticle)로 언급된다. 이 이론에 의하면 높은 전기장이 있을 때 강한 전기 역학적 힘이 전극 표면에서 돌출한 부분을 떼어내고, 이것이 하전입자로서 갭에 들어가서 빠른 속도로 반대 극으로 가속하여 충돌할 때, 그들의 운동에너지를 열이나 기계적 충격 에너지로 소실된다. 이 충격 에너지 밀도가 충돌 물질에 의존하는 어떤 임계값을 넘으면 입자와 표적 전극의 충분한 기화가 일어나 국소 미세 플라즈마(micro-plasma)가 형성되어 갭이 방전을 시작한다.

2.1.3 트리거가 있는 갭의 방전

위에서 갭이 방전하는 두 가지 메커니즘에 대해서 간략하게 살펴보았다. 먼저 트리거가 없는 경우 방전이 일어나는 상황은 미시적인 구조에 상당히 민감함을 위에서 보았다. 따라서, 트리거가 없는 경우는 어떤 주어진 갭과 진공 상태에서 어떤 전압에서 방전이 일어났다고 해서 다음에 또 그 전압에서 방전이 일어날 것이라고 예상할 수 없다. 그러나, 트리거가 있는 경우 메인 갭에 고전압을 인가한 다음 트리거를 인가하면 예상된 결과를 얻을 수 있다.

2.2 실험 장치

포항 가속기 연구소의 TVS 실험장치를 그림 3에 보였다. 8" 메인 챔버와 6" 보조 챔버가 있고, 메인 챔버에는 전극과 트리거가 있고 중간은 유리로 되어 있어 방전을 관찰할 수 있으며, 보조 챔버에는 트리거 라인을 위한 피드스루(feedthrough)와 진공 펌프를 위한 포트(port)와 진공 게이지를 위한 포트 등이 설치되어 있다. 진공 펌프는 Alcatel 사의 molecular drag pump(type 5011 standards -5011cp)이고, 게이지는 Pfeiffer 사의 compact process ion gauge IMR260로 전 영역의 진공에서 사용 가능하다. 전류 측정을 위한 C.T.(Current Transformer)는 EEV 사(English Electric Valve, Ltd.)의 MA459C 타입으로 200 A/V이며, 100 kA까지 측정 가능하며, 두 개의 병렬 회로 중에 하나에 사용하므로 실제로는 최대 200 kA까지 측정할 수 있다. 전압 측정은 Tektronix의 1000:1 고전압 프루브(probe)를 이용하였다. 위의 C.T.와 고전압 프루브에서 나온 신호는 Tektronix사의 DSA 602A digitizing signal analyzer로 분석하였다. 축전기 사이에 있는 바닥에서부터 세 개의 물체는 무거운 TVS 시스템을 지지하기 위한 잭(jack)들이다.

2.2.1 실험 회로

TVS의 실험 회로는 간단한 형태를 하고 있으며 그림 4에 보였다. 먼저 최대 50 kV인 직류 전원 공급 장치에서 충전 저항 R(50 k Ω)을 거쳐 축전기(16.22 μ F)

에 충전이 되고, 트리거 제어기(trigger controller)가 펄스 신호를 스위치에 보내면 메인 갭에 방전이 일어나 스위치가 작동하는 것이다. 덤프 스위치는 TVS 방전 후 남아 있는 잔류 전하를 방전하기 위한 것이다. 트리거 장치는 최대 전압이 10 kV인 직류 전원 공급 장치에 다단 임펄스 발생기(multistage impulse generator)를 거쳐 작동하게 되어 있다.

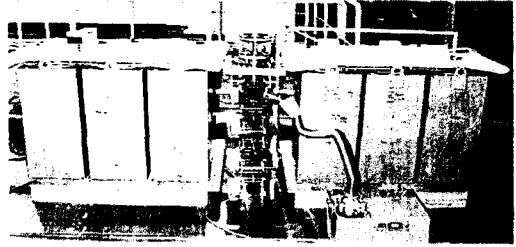


그림 3. 포항 가속기 연구소의 TVS 실험 장치 : 양쪽에 세 개씩 축전기가 있다. 그 위로 알루미늄 음극판과 마일라(mylar)로 싸인 알루미늄 양극판이 있고, 사진 중앙에 메인 챔버와 그 아래 보조 챔버가 앞쪽에 진공 펌프가 있다.

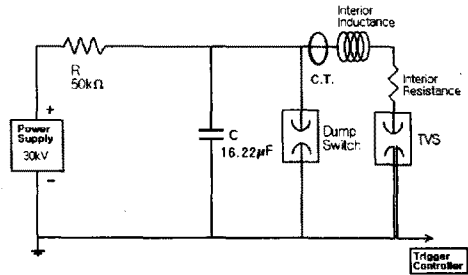


그림 4. TVS 실험 회로.

2.2.2 TVS의 전극 제작 및 배열

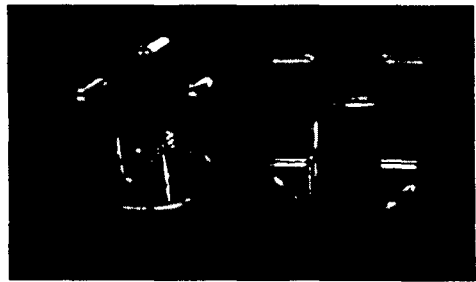


그림 5. 기계적 가공 후 기계적 폴리싱과 화학적 폴리싱을 거쳐 세척후 건조가 끝난 OFHC 전극들, 트리거 홀이 있는 좌측이 음극이고, 우측이 양극이다.

그림 5는 포항 가속기 연구소에서 디자인하고 제작된 전극을 보여 주고 있다. 전극물질은 OFHC로 직경이 74 mm이고, 높이가 71 mm이며, 6-갭이 되도록 3개의 사다리꼴 기둥이 있고, 각 모서리는 끝머리 효과(edge effect)를 없애기 위해 둥글게 처리했다. 전극은 기계 가공을 거친 뒤 사포로 폴리싱을 한 후 황산 수용액(H₂O₂ 750 ml, H₂SO₄ 15 ml, Bright dip 30 ml and H₂O 3000 ml)에 약 35°C에서 3 시간 가량 화학

적 폴리싱(polishing)하여 아세톤과 에탄올에서 각각 5 분씩 조음과 세척을 한 다음 건조시켜서 장착되었다. OFHC는 대기 중에서 쉽게 산화하므로 가능하면 대기에 노출되는 시간을 줄여야 했다. 그림 6은 8" 메인 챔버 속에서 조립된 TVS의 설계도이다. 그림 6에서 스위칭을 관찰할 수 있도록 원통형 챔버의 가운데 부분을 따라 유리로 되어 있어 사방에서 안을 볼 수 있으며, 이 부분이 고전압의 절연도 한다. 전극과 연결부를 하나로 만들 수도 있었지만, 전극 물질을 바꿔가며 실험하기에는 연결부는 그냥 든 채 전극만 바꿀 수 있도록 두 개로 나누는 것이 유리할 것이다. 아래가 음극이고, 위가 양극인데 음극 연결부 중앙에 직경 25 mm의 구멍은 진공 배기와 트리거 전극이 들어가기 위한 것이다.

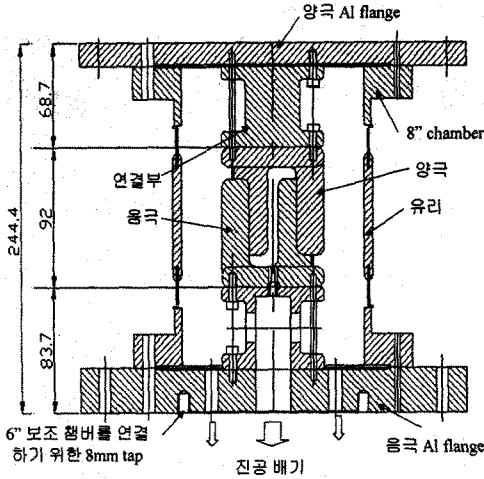


그림 6. 주 챔버(Main Chamber) 구성 : OFHC 전극들과 트리거 홀이 음극에 있고, 챔버 내부를 볼 수 있는 유리 챔버가 있다.

2.3 실험 결과

2.3.1 TVS의 실험 전류 파형

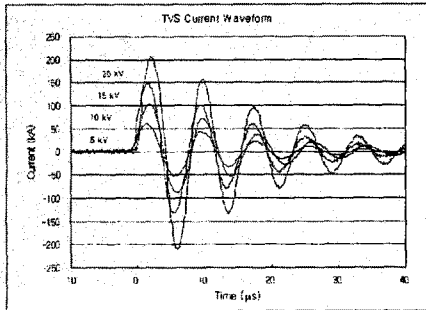


그림 14. PAL의 TVS의 전류 파형(5, 10, 15, 20 kV 인가 전압)

TVS 스위치의 내부가 3.4×10^{-5} mbar에서 트리거했을 때의 TVS의 전류 파형이 그림 14에 보였다. 그림 14의 TVS의 전류 파형에서 메인 축전기에 20 kV, 15 kV, 10 kV, 5 kV를 충전하여 방전시켰을 경우의 각각의 전류는 약 200 kA, 150 kA, 100 kA, 50 kA였다. 200 kA의 경우 전류 오름 시간(rise time)은 약 2 μ sec였고, 펄스 폭 약 3 μ sec였다.

3.2.2 PAL의 TVS와 Maxwell의 TVS40과의 비교

포항 가속기 연구소에서는 이 모델을 기초로 TVS를 디자인했다. 따라서 이러한 디자인을 위하여 먼저 TVS-40을 자세히 고찰하였으며 표 1에 PAL과 Maxwell의 TVS 시스템 구성과 동작 특성을 비교하였다.

표 1 PAL과 Maxwell의 TVS 구성과 동작특성 비교

| TVS 구성품 및 특성 | PAL TVS | Maxwell TVS-40 |
|--------------|---------------------|---------------------|
| 전극 구조 | 6 gap rod | 6 gap rod |
| 전극 구성 | 3 음극, 3 양극 | 3 음극, 3 양극 |
| 전극 모양 | 사다리꼴, 원통형 | 사다리꼴, 원통형 |
| 전극 재료 | OFHC copper | CrCu, FeCu, Cu |
| 갭 간격 | 8 mm | 8 mm, 12 mm |
| 동작 압력 | $\sim 10^{-6}$ torr | $\sim 10^{-7}$ torr |
| 축전기 용량 | 16.22 μ F | 6000 μ F |
| 축전기충전전압 | 1 ~ 30 kV | 0.2 ~ 3.5 kV |
| 동작 전압 | 1 ~ 30 kV | 0.3 ~ 25 kV |
| 최고동작전압 | 40 kV | 40 kV |
| 최고 동작 전류 | 200 kA | 180 kA |
| dI/dt | 10^{11} A/s | 10^9 A/s |
| 전하 전달량 | 0.5 C | 50 C |

3. 결 론

포항가속기 연구소에서는 간단한 트리거를 가진 OFHC 전극의 TVS를 설계하여 제작 및 실험하였다. 실험 결과 PAL의 TVS는 3.4×10^{-5} mbar에서 20 kV의 인가 전압을 트리거했을 경우 첨두 전류는 약 200 kA였다. 이는 Maxwell의 TVS-40과 유사한 첨두 전류를 가짐을 관찰할 수 있었다. 마이크로 단위의 정밀한 표면 처리 기술과 TVS에 적합한 전극 물질을 개발하고, 축전기의 용량의 향상과 정확하게 작동하고, 수명이 긴 트리거의 개발로 스위치의 성능 향상을 기대할 수 있을 것이다. 앞으로 트리거 개발과 병행하여 전극재질의 연구 및 Seal-off된 TVS를 개발할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Fowler, R. H. and Nordheim, L., Pro. Roy. Soc. A119, 193-81, (1928)
- [2] Miller, H. C., "J. Franklin Inst.", 282, 382-8, (1966)
- [3] Miller, H. C., "J. Franklin Inst.", 289, 347-51, (1969)
- [4] Vibrans, G. E., "Tech. Report" 353, Lincoln Lab., MIT (NTIS ESDTER 64-327), (1964)
- [5] Chatterton, P. A., "Proc. Phys., (London), 88, 231-45, (1966)
- [6] Cranberg, L., "J. Appl. Phys.", 23, 518-22 (1952)
- [7] J.M. Lafferty, "Proc. IEEE", Vol. 54 No. 1, pp. 23-32, (1966)
- [8] Belan, N.V., Gaidukov, V.F., Kostyuk, G.I., Ostrovkii, E.K., and Strelkov, I.V., Sov. Phys. Tech. Phys., 17, 303 (1977)
- [9] Kovalenko, V.P., Makarevich, A.A., Rodochkin, V.A., and Timonin, A.M., Sov. Phys. - Tech. Phys., 19, 1429 (1975)