

TVS에서 아크 플라즈마의 분광 측정 연구

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

Spectrum Measurement Study of Arc Plasma on Triggered Vacuum Switch (TVS)

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

**Abstract** - The purpose of this experiment was to develop Triggered Vacuum Switch(TVS) and to improve understanding of the high current vacuum arc phenomena in the TVS. 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. Breakdown of the TVS produced high current vacuum arc plasma. A spectroscopic measurement was performed over 20 kA peak current in the center of electrodes, in the vicinity of cathode, and outside electrodes. The electrode material tested was Fe. Measured Fe spectrum range was from 200 nm to 900 nm. Measurement result showed that over 90 percent of the charge states were FeII and the others were FeI and FeIII. The electron temperature was determined from the relative line intensity ratio method of FeII system by assuming the local thermal equilibrium(LTE). The electron temperature at the center of electrodes was measured as 1.5 eV at 26 kA peak current. The electron temperature varied with its peak current. Intensity of spectrums is the highest in the vicinity of the cathode. Further we will also present study result of the diode phenomena in the TVS.

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/ $\mu$ s 이하일 경우 100%의 정류 작용을 보이게 되었다. 현재에도 러시아의 VEI(All-Russian Electrotechnical Institute)에서 각종 TVS의 전극 형상과 재료에 대한 연구를 수행 중에 있다.

본 실험은 포항가속기연구소에서 대전력 펄스형 스위치 개발 중에 수행된 것으로서 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 TVS의 제조 및 전극 물질의 개발과 물질에 따른 전기적 실험이다. 둘째는 TVS의 고 전류 아크 방전 현상을 연구함에 있어서 측정되는 방전 플라즈마에 요동을 최소화하는 분광학적 실험이다.

지금까지 대부분의 진공 아크 방전 연구는 이상적인

전극형태(평행판 전극)에서의 peak current가 수십 A의 낮은 전류 혹은 5~10 kA 정도의 비교적 높은 방전 전류상태에서의 여러 가지 물리적인 현상을 토대로 한 음극의 spots의 현상, 음극에서의 침식현상, 진공 아크 스위치 동작 중 양극 spots의 영향, 양극의 spots 생성에 직접적인 영향을 주는 전극간 플라즈마의 물리적 특성 그리고 방전 현상의 이론적 모델형성을 위한 많은 연구가 수행되어 왔다[1, 2].

본 실험에서 TVS의 진공 아크 방전의 분광학적 연구는 rod-array 형태의 독특한 전극 구조에서 peak current가 20 kA 이상의 매우 높은 전류의 방전 현상을 측정 한 것이다. 이때 전극은 비교적 분광적 데이터가 잘 알려진 Fe 전극을 이용하여 고 전류 방전현상을 기술할 수 있는 물리적인 모델이라던가 혹은 방전 특성을 잘 알려 줄 수 있는 전극간 플라즈마의 중요한 파라미터인 전하 분포와 전자온도를 측정하였다.

따라서 본 실험은 TVS의 전극 물질에 따른 전기적 특성을 연구하고 고 전류 아크 방전현상에서의 물리적인 파라미터들을 연구함으로써 전극간의 고 전류 아크 방전의 현상을 이해하여 향상된 스위치 개발에 도움을 줄 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1 전자 온도의 측정

실험실 플라즈마에 의해 방출된 광자에너지들의 분포는 흑체 복사와 매우 다르기 때문에 실제 플라즈마에서 완전한 열역학적 평형 상태를 나타낼 수 있는 그 계의 유일한 온도를 제시하기는 거의 불가능하다.

그러나 만약 실제 플라즈마 내에서 에너지 흐름이 점진적으로 일어나고(온도의 공간적 기울기가 작은) 입자들 사이의 에너지 교환이 충돌에 의해 대부분 일어난다고 가정을 한다. 또한 이때 충돌에 의한 에너지 교환이 아주 빠르게 일어난다. 그리고 이 충돌과정은 그 역과정을 수반하여 균형을 이루며 상대적으로 복사과정에 의한 에너지 교환이 적을 때, 전체 플라즈마의 아주 작은 부분에서 열적 평형을 나타내는 유일한 온도를 구할 수 있다. 실제 플라즈마와 같은 비선형적인 원천에서의 이와 같은 평형 상태를 국소 열역학적 평형(Local Thermodynamic Equilibrium)[3]이라 한다.

국소 열역학적 평형에서 에너지 준위에 분포해있는 자유전자들은 통계역학적으로 완전 열역학적 평형과 같이 맥스웰 속도 분포를 갖는다. 즉 질량이  $m$ 이고 속도의 분포가  $v \sim v + dv$ 사이의 입자의 분포는 아래와 같이 표현된다.

$$dn_e = n_e \pi \left( \frac{m}{2\pi x T_e} \right) \exp \left( - \frac{mv^2}{2x T_e} \right) v^2 dv \quad (1)$$

여기서  $n_e$ 는 자유전자의 밀도,  $T_e$ 는 전자 온도를 나타낸다. 구속된 준위에서의 입자들은 볼츠만 방정식과

사하 방정식을 따르는데 볼츠만 방정식은 각각의 여기된 준위들 사이에서 입자들의 분포밀도에 대한 관계식이며 사하 방정식은 서로 다른 이온화 단계를 지나는 모든 입자들의 분포밀도를 나타낸다.

$$\frac{n_{r,j}}{n_{r,j}} = \frac{g_{r,j}}{g_{r,j}} \exp\left(-\frac{E_{r,j}}{kT_e}\right) \text{ 또는 } \frac{n_{r,j}}{n_r} = \frac{g_{r,j}}{U_r(T_e)} \exp\left(-\frac{E_{r,j}}{kT_e}\right) \quad (2)$$

여기서  $n_{r,j}$ 는 여기준위에서 입자의 분포밀도,  $n_r$ 는 바닥 준위에서 입자의 분포밀도,  $g_{r,j}$ 는  $j$  준위의 축퇴도(전하  $r$ ),  $g_r$ 는 바닥준위의 축퇴도(전하  $r$ ),  $E_{r,j}$ 는 여기에너지,  $U_r(T_e)$ 는 분배함수를 나타낸다.

$$\frac{n_{r+1}}{n_r} = \frac{1}{n_e} \frac{2U_{r+1}(T_e)}{U_r(T_e)} \frac{(2\pi m_e kT_e)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_r}{kT_e}\right) \quad (3)$$

여기서  $n_{r+1}$ 는 전하가  $r+1$ 인 입자의 분포밀도,  $n_r$ 은 전하가  $r$ 인 입자의 분포밀도를 나타낸다. 위의 (1)~(3) 방정식들은 국소 열역학적 평형인 플라즈마에서 전자들의 상태를 나타낸다.

만약 플라즈마가 광학적으로 얇은 상태(optically thin)라면 구속된 에너지 준위  $j$ 에서 준위  $i$ 로 복사전이 할 때 스펙트럼의 세기는 다음과 같다.

$$I = h\nu_{ji} A_{ji} n_{r,j} l \quad (4)$$

여기서  $\nu_{ji}$ 는 복사선의 방출 주파수,  $A_{ji}$ 는 자연 방출의 절대전이 확률,  $n_{r,j}$ 는 전하가  $r$ 인 입자분포밀도,  $l$ 은 플라즈마의 두께를 나타낸다. 같은 종(species)들의 같은 이온화 단계에서 전이 하는 스펙트럼 선들의 상대적인 세기 비에 의해서 전자 온도를 구하는 방법은 식 (3), (4)에 의해서 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{I_{ji}}{I_{nm}} = \frac{\nu_{ji}}{\nu_{nm}} \frac{A_{ji}}{A_{nm}} \frac{g_{r,j}}{g_{r,n}} \exp\left[\frac{(E_{fn} - E_{fj})}{kT_e}\right] \quad (1-25)$$

상대적인 스펙트럼선의 세기들은 여기준위의 에너지의 크기에 달려 있기 때문에 만약 이들 에너지 차가  $kT_e$ 에 비해서 적다면 이 방법에 의한 측정법은 많은 오차를 가지게 될 것이다. 따라서 이 방법을 사용하려면 여기준위의 에너지 차가 커야되고 이 식에 사용될 각각의 두 스펙트럼이 비교적 가까이 있으면서도 뚜렷이 구분되어야 한다. [4,5,6]

## 2.2 실험 장치

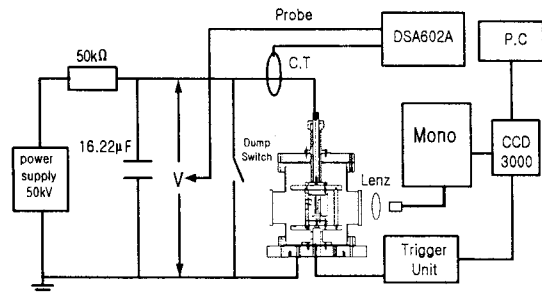


그림 1. TVS 실험 회로도

그림 1은 TVS system의 전기적 및 분광적 측정을 위한 회로도이다. 실험을 하기 전에 챔버의 진공을

$\sim 10^{-7}$  Torr까지 낮춘 후 최대 50 kV인 직류 전원 공급 장치로부터 충전저항 50 kΩ을 거쳐 16.22 μF의 외부 축전기를 충전시킨다. 트리거 장치로부터 주 챔버 내의 트리거 전극에 양(positive)의 트리거 펄스를 인가하면 음전극과 트리거 전극 사이에 방전이 일어나 음극 전극의 hole에 아크가 발생된다. 이 아크에 의해 주 전극 사이에 아크 방전이 발생하면서 외부 축전기의 전하가 방전되어 TVS가 작동된다.

TVS 장치의 내부에 있는 메인 전극은 rod-array 형태의 구조를 가지고 있으며 각 모서리는 끝머리 효과를 없애기 위해 둥글게 처리했다. 그리고 양극과 음극을 서로 장착했을 때 두 전극사이의 거리는 8mm이다. 전극의 재질은 OFHC와 Fe로서 제작을 하였다. TVS가 방전될 때 분광의 관찰은 YOBIN YVON 사의 HR460을 사용하였다. 양극과 음극전극의 사이를 좀더 세밀하게 관찰하기 위해 렌즈를 사용하여 분석을 하였다. 본 분광기에는 1200 grooves/mm의 holographic grating이 사용되어 190 nm - 900 nm까지의 파장을 분광할 수 있으며 이때 출구 slit 근처에서의 dispersion은 1.76 nm/mm이고 resolution은 1200 grooves/mm grating을 사용할 때 500 nm의 파장에 대해 0.04 nm이다. 또한 이 분광기의 detection system은 R928 PMT와 CCD 3000를 사용하고 있다.

## 2.3 실험결과

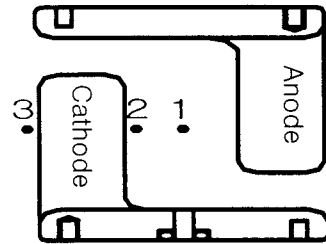
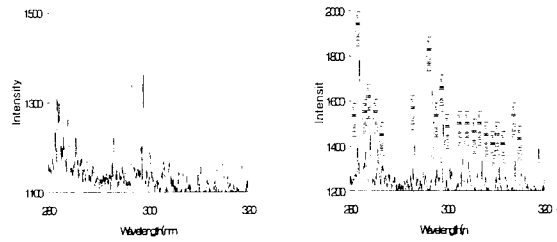
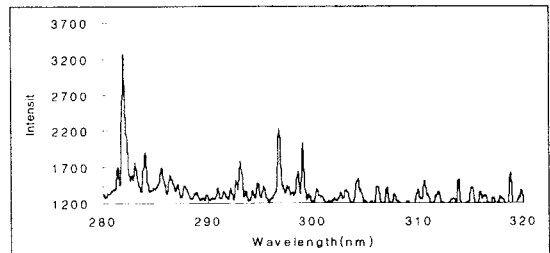


그림 2 렌즈 초점의 위치 1: 전극 중간, 2: 음극 옆 3: 전극 바깥



(a) peak current 26 kA

(b) peak current 68 kA



(c) peak 110 kA

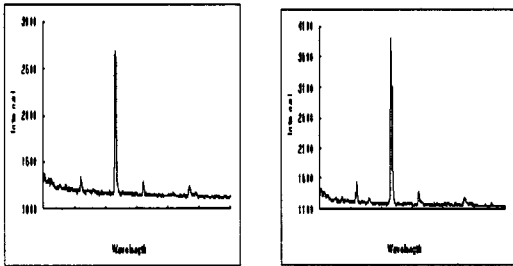
그림 3. TVS 방전 전하 상태

방전현상을 측정할 때 Cu전극의 분광학적인 분석을 위한 여러 자료들이 불분명하여 이론적인 접근이 용이하지 않으므로 이 실험은 분광 분석을 위한 여러 자료들이 상대적으로 잘 알려진 Fe전극을 가지고 실험을 하였다.

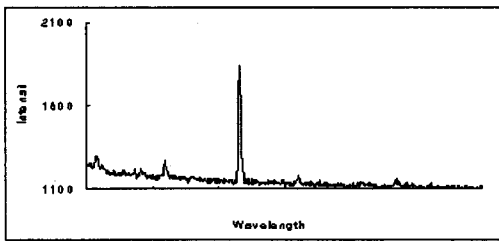
우선 TVS가 방전될 때 Fe로 된 주 전극 사이에서 어떠한 전하상태(charge state distribution)의 입자들이 존재하는지 측정을 하였다. 전하 상태를 측정하기 위해 분광기의 입구 슬릿을 100  $\mu\text{m}$  로 연 상태에서 grating을 20 nm 씩 변화 시켜 가면서 파장 영역이 200 nm에서 900 nm까지를 측정하였다. 이때 방전 전류의 첨두치는 각각 약 26 kA, 64 kA, 110 kA 이다. 측정의 위치는 그림 2에서 보는 것과 같이 전극사이의 중간인 1번 위치에서 측정을 하였다.

정확한 파장을 분석하기 위해 파장을 옮길 때마다 각 파장에 해당하는 Oriol 사의 표준램프를 사용하여 눈금 맞추기를 하였다. 측정후 각각이 첨두전류에 대한 스펙트럼 중 일부만이 그림 3에 나타나 있다. 즉 그림 3의 (a), (b), (c)는 200 nm에서 900 nm의 스펙트럼중 280 nm에서 320 nm 사이의 분광선들을 보여 준다

200 nm에서 900 nm 사이의 분광선 중 대부분의 전하상태는 FeII(90%이상) 선들로서 단일 이온화 상태(singly ionized state)가 주를 이루었고 나머지가 FeI, 그리고 일부분의 FeIII로 구성되어 있었다.



(a) 두 전극 가운데 1번 (b) 음극 옆 2번



(c) 전극 바깥 3번

그림 4. 초점 위치에 따른 스펙트럼의 세기 변화

위의 방전전류의 첨두치가 64kA 일 때 그림 3에서 본 것과 같이 측정위치에 따라 분광선의 intensity의 변화를 측정하여 보았다. 그림 4의 (a)는 위치 1, (b)는 위치 2, (c)는 위치 3에서의 분광선이다. 선들의 세기의 비는  $2 > 1 > 3$ 의 순서이다. 즉 음극 근처에서 가장 강한 빛의 세기가 검출되었다. 또 앞의 그림 3에서는 전류가 높을수록 빛의 강한 세기가 측정됨을 알 수 있었다. 전류의 변화 혹은 공간의 위치에 따라 빛의 세기가 달라진다는 것은 방전될 때 발생하는 전하 전달자들의 밀도와 온도가 공간에 따라 혹은 전류의 증감에 따라 변화한다는 것을 알려 준다. 따라서, 음극의 근처에서 온도가 가장 높음을 추정 할 수 있다.

또한 방전 전류가 각각 26 kA와 64 kA 일 때 분광선들의 상대적인 세기를 측정하여 온도를 계산하였다. 상대적인 세기에 사용된 두 분광선은 FeII402.4선과 FeII429.6선을 사용하였다. 이 두선은 비교적 가까이 있으면서도 전류의 변화에 민감하게 반응을 하였다. 우선 두 선의 세기 비를 얻기 전에 400 nm에서 440 nm 까지 Oriol 사의 아르곤(Ar) 표준램프를 사용하여 눈금 맞추기를 하였다. 그림 5는 첨두치 전류가 64

kA 일때의 400 nm 에서 440 nm 사이의 분광선의 모양이다. 온도를 계산하기 위해 필요한 여러 데이터들은 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 atomic spectra database에서 인용하여 표 1에 나타내었다.

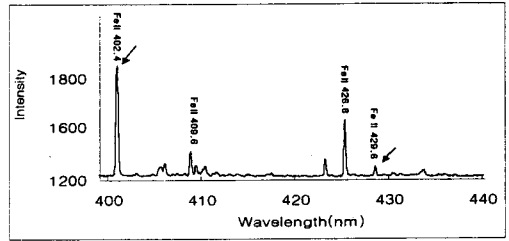


그림 5. 초점 위치 1번에서 peak current 68kA 일 때의 스펙트럼

표 1. FeII 402.4 과 FeII429.6의 Spectral data

spectrums	transition state	g	$A(10^8 s^{-1})$	$\nu$	Energy(eV)
FeII 402.4	n $\rightarrow$ m	6	$2.3 \times 10^{-3}$	3.08/h	7.57
FeII 429.6	j $\rightarrow$ i	6	$5.9 \times 10^{-4}$	2.89/h	5.59

위의 그림 5에서 측정된 FeII4024(A)선과 FeII 4296(A) 분광선의 상대 세기와 표 1의 data들을 이용하여 전자온도를 계산하면 방전 전류가 26 kA일때는 1.5eV, 64 kA일때는 2.5eV가 되었다.

### 3. 결론

본 실험은 Cu와 Fe 재질로 rod-array 형태의 TVS 장치를 제조하였다. 우선 첫째로 전기적 측정을 하여 이 장치가 대전력용 고전류 스위치에 사용 가능하다는 것을 보였다. 둘째로 분광학적 자료가 비교적 잘 알려진 Fe 전극을 이용하여 첨두 전류가 20kA이상에서의 방전 현상을 분광학적으로 관찰하였다. 관찰되는 주 전하 분포는 FeII가 90% 이상을 차지하였고 나머지가 FeI과 FeIII로 구성되어 있었다. 따라서 TVS의 아크 진공 방전시 전하반자가 전극물질로 구성되어있음을 알 수 있었다. 그리고 전극 사이의 공간과 전류의 변화에 따라 스펙트럼의 세기가 달라지는 것을 보았고 온도를 직접 계산하여 보았다. 측정된 온도는 평행판과 같은 이상적인 전극 형태의 진공 스위치에서 낮은 방전전류(수백 암페어)로 행해진 진공 아크방전 실험과 비교할 때 거의 비슷한 정도를 보여 주었다. 따라서 rod-array 형태의 전극을 사용한 TVS가 높은 전류에서도 상대적으로 낮은 온도를 나타냄으로써 전극의 손실이 적음을 추정 할 수 있었다.

### (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 Wiley & Sons New York, 1997.
- [4] Richard H. Huddleston and Stanley L. Leonard, "Plasma Diagnostic Techniques" Academic Press New York, 1965
- [5] Hans R. Griem, "Plasma Spectroscopy", McGraw-Hill, New York, 1964
- [6] Auciello, "Plasma Diagnostics", Academic Press, New York, 1989