

## 슈더스파크 스위치 개발

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

### Development of Pseudospark Switch

S.H.Nam\*, Y.J.Han, S.C.Kim, S.H.Kim, S.S.Park

Accelerator department, Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH

**Abstract** - A multi-gap pseudospark is high power switching with a wide dynamical voltage range. The pseudospark system has been operated at the voltage of 5 ~ 20 kV and the pressure range of 35~80 mtorr. The switching current of the pseudospark switch was measured as 106 kA for 3 gaps, 124 kA for 4 gaps, 120 kA for 5 gaps. The current duration is about 0.9  $\mu$ s in each multi-gap switch. To obtain the characteristics of the switch, this paper describes the results of tests.

### 1. 서 론

초기의 전자빔 소스(source)로 개발된 Pseudospark 스위치는 당시에는 대전력 스위치로는 주목받지 못하였다가 80년대 이후부터 대전력 스위치로 개발되기 시작하였다. 현재는 그 산업적 효용성이 입증되면서 시장에서 독일을 중심으로 많은 연구가 진행되고 있다. 현재 까지 알려진 pseudospark의 특성을 정량적으로 잘 설명하는 이론은 찾아보기 힘드나, 이에 대한 실증연구는 활발히 진행되고 있다[1~3]. Pseudospark 시스템의 방전 시에 흐르는 매우 큰 전류는 field enhanced thermionic electron emission으로 설명이 가능하며, 방전전압과 압력의 관계는 cathode hole 내부에 존재하는 진동하는 전자(pendular electron) 때문에 평행판 구조와는 매우 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다[4]. 본 논문의 내용은 Pseudospark Discharge System에 대한 이해까지 연구결과를 요약한 것으로서 크게 세 부분으로 나누어져 있다. 첫 부분은 pseudospark에 대한 이론적인 부분으로 가스방전의 기본 법칙인 Paschen 법칙, pseudospark의 기본 원리를 설명하였고 두 번째 부분에서는 Pseudospark 스위치의 제작에 관련하여 스위치의 동작 시의 특성들, 그리고 제작된 Pseudospark 시스템에 대한 설명으로 이루어져 있다. 마지막 부분에서는 제작된 Pseudospark 시스템으로 수행한 스위치 동작 특성에 대한 기술로서 방전전압과 압력과의 관계, 방전전압과 전류와의 관계, 스위치 전류 파형, anode를 통하여 방출되는 전자의 전류 파형 등에 대한 설명을 하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 Pseudospark switch의 기본 메커니즘

##### 2.1.1 Paschen 법칙

가스진공 속의 전극 사이로 전류가 흐르기 위해서는 자유롭게 움직이는 전하들이 형성되는 환경을 만들어야 한다. 그 예로서 자연환경에 존재하는 코스모광선(cosmic ray)에 의한 이온화 과정을 들 수 있다. 이 광선은 대개 단위  $\text{cm}^{-3}$  그리고 초당 10~100 개의 전자들을 형성시킨다. 그러나 이 정도의 전자 수는 전기적 전류의 흐름에 있어서는 무시 될 정도로 작은 수이다.

낮은 가스 진공 속에서 보다 확실한 전류 흐름을 만들어내기 위해서는 인공적으로 전극 사이에 자유전하를 만들어 내야 한다. 예를 들어 X-ray나 빠른 전자빔을 가스 진공사이로 넣어주거나 광전자 방출 물질로 전자를 만들어 내는 방법 등이 있다. 전극 사이의 전기장이 방전의 문턱값(threshold value)보다 낮으면 전극사이에 흐르는 방전전류는 external ionizer를 제거하면 없어질 것이다. 이러한 방전현상을 non-self-sustained라고 한다[5]. 그러나 전극사이의 전기장의 크기가 breakdown 전압 이상이 되면 전극 사이의 방전은 external ionizer가 없이도 방전을 일으키게 된다. 전극사이의 전압을 천천히 올리게 되면 전기장은 점차 breakdown 전기장에 근접하게 된다. 그때 전극사이에서는 약한 prebreakdown이 일어나게 되는데, 좀 더 전압을 올리게 되면 급격하게 전류가 증가되는 현상이 관측되면서 전극사이의 전압은 감소하게 된다. 이러한 현상을 self-sustained discharge 혹은 breakdown이라고 부른다[6]. 실험적으로 전류가 급격히 증가하게 될 때 인가해준 전압을 breakdown 전압,  $V_b$ 라 부른다. 많은 실험에서 breakdown이 일어나기 위한 조건은 가스압력  $p$ 와 전극사이의 거리  $d$ 를 곱한 값인  $pd$ 에 의한 함수,

$$V_b = f(pd)$$

로 나타내고 있으며 이를 처음으로 공식화한 사람의 이름을 따서 Paschen 법칙이라고 부른다. 그럼 1은 여러 종류의 가스에 대한 Paschen 곡선을 보여준다.

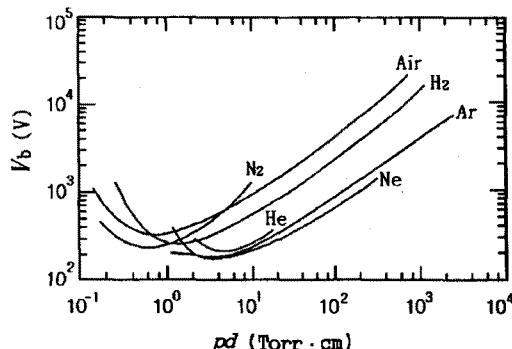


그림 1. 여러 종류의 가스에 대한 Paschen 곡선

그림 1에서 보듯이 Paschen 곡선들은 모두 그 최소값을 가짐을 볼 수 있다. 다시 말해서 Paschen 곡선에서 보여주는 최소 전압 아래로는 가스 방전이 일어나지 않는다는 의미이다. Paschen 곡선의 최소값을 기준으로 곡선의 오른쪽 영역에서는 breakdown 전압이 전극 사이의 거리가 증가할 수록 커진다. 이것은 breakdown이 짧은 경로(short path)에서 전개된다는

뜻이다. Paschen 곡선의 왼쪽 영역에서는 오른쪽 영역과는 반대로 전극사이의 간격이 늘어날수록 breakdown 전압은 줄어든다. 다시 말해서 방전이 긴 경로(long path)에서 전개된다는 의미이다. Paschen 법칙의 breakdown 전압은 다음 식과 같이 주어진다.

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln(pd) + \ln\left[\frac{A}{\ln(1+1/\gamma)}\right]}$$

위식은 일반적으로 널리 알려져 있는 Paschen 법칙의 공식이며 오늘날까지 가스 방전을 기술하는데 있어서 중요한 법칙으로 사용되고 있다.

### 2.1.2. Pseudospark switch의 메커니즘

Pseudospark 방전을 일으키는 구조는 그림 2와 같이 평행판의 중간에 구멍이 뚫려 있는 구조이며 그림 3에서 보듯이 pseudospark는 hollow cathode 구조를 가지고 있다.

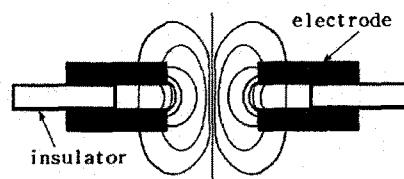


그림 2. Pseudospark를 일으키는 구조

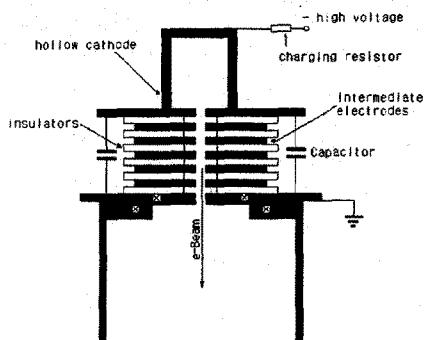


그림 3. Pseudospark System의 대략도

일반적으로 pseudospark가 실현되는 구간은 전공방전(vacuum discharge)과 Paschen minimum 사이이다[4]. 그림 3에서 보듯이 Pseudospark switch는 크게 hollow cathode, intermediate gap 그리고 main chamber로 구성되어 있다. 특히, hollow cathode는 Pseudospark 스위치에 있어서 가장 중요한 부분으로서 방전과 높은 밀도의 플라즈마가 생성되는 곳이다. Breakdown이 일어나기 전, 외부의 전원으로부터 공급된 전하는 외부의 축전기에 축적되고 이로 인해, hollow cathode의 벽의 포텐셜은 점진적으로 증가한다. 전압이 breakdown 전압 근처까지 도달하게 되면 prebreakdown이 전극 갭들의 사이에서 먼저 일어나게 되고, 그 후 주방전이 hollow cathode에서 일어나게 된다[1][7].

### 2.2. Pseudospark switch의 제작

그림 4는 제작된 Pseudospark 스위치이다. 스위치의 anode는 8인치 유리챔버(glass chamber)를 올려놓을 만큼 충분히 크게 고려하여 270 mm로 제작하였

으며 두께 22 mm, 구멍의 직경은 4 mm이다. Hollow cathode는 높이 50 mm, 직경은 40mm이며 가운데 4mm의 구멍이 나있다. 절연체로는 처음에 그 직경을 70 mm로 하다가 외부의 뜻하지 않는 방전 현상을 방지하고자 그 직경을 100 mm로 수정하였고, 두께는 5 mm, 중앙에 25 mm의 구멍이 나 있다. 전극은 직경이 64 mm, 두께 5 mm, 중앙에 4 mm의 구멍이 나 있다.

### 2.2.1. Pseudospark 스위치

그림 4은 Pseudospark 스위치가 장착된 챔버의 모습이다.

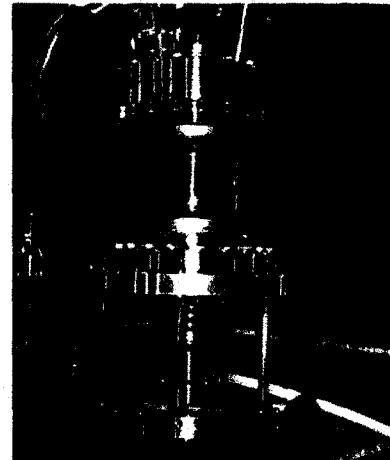


그림 4. 스위치 위에 챔버가 부착된 모습

에너지 저장용으로 사용한 축전기(Capacitor)의 용량은  $2.7 \mu F$ 이며,  $50 k\Omega$ 의 저항을 통하여 충전된다. 축전장치로는 양극을 통하여 나오는 전자빔의 전류 파형을 측정하기 위한 Faraday Cup, 스위칭전류(switching current)를 측정하기 위한  $100 : 1$ 의 비율을 가진 Current Transformer(CT), 그리고 Faraday Cup과 CT를 연결하는 오실로스코프는 Tektronix에서 제작된 모델명 DSA 602(Digitizing Signal Analyzer)를 사용하였다. 사용한 게이지는 ion gauge로 모델명 IMR 260이며 가스밸브는 Phillips의 203 Variable Leak Valve를 사용하였다.

### 2.2.2. Pseudospark 스위치의 성능 실험

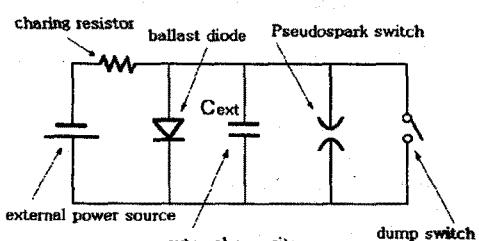


그림 5. 실험 회로도

그림 5은 Pseudospark 스위치의 실험을 위한 회로도이다. 실험에서 얻은 breakdown 전압에 따른 압력의 데이터를 표 1에 나타내었고 그림 6은 표 1의 데이터에서 얻은 breakdown에 대한 압력-전압의 그래프이다. 그림 6에서 보듯이 갑수가 줄어들수록, 다시 말해서 전

극간의 간격이 줄어들수록 breakdown 전압에 대한 압력이 높아짐을 보여주고 있다.

표 1. 실험값 : Breakdown 전압과 압력

breakdown voltage ( kV )	pressure ( mTorr )		
	3 gap	4 gap	5 gap
5	83	81	72
10	57	56	50
15	48	47	43
20	44	43	38
25	42	40	35

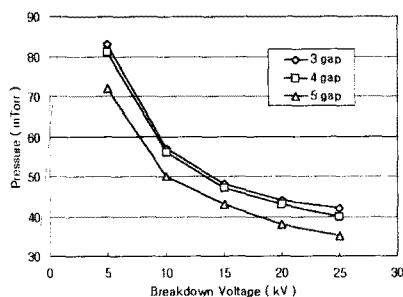


그림 6. Breakdown 전압과 압력

표 2에서는 breakdown 전압에 따른 스위칭전류를 나타낸 것이다. 표 2에서 보듯이 스위칭의 최대전류는 4 캡을 사용하여 25 kV에서 방전시켰을 때 124 kA로 측정되었다. 그림 7은 표 2의 값들을 그래프화 한 것이며 그림 8은 방전시간에 따른 스위칭전류의 파형을 나타낸 것이다.

표 2. 실험값 : Breakdown 전압과 스위칭전류

breakdown voltage ( kV )	switching current ( KA )		
	3 gap	4 gap	5 gap
5	23.0	24.3	26.2
10	46.0	47.4	48.6
15	75.5	75.5	74.2
20	99.8	99.8	101.1
25	106.2	124.2	119.7

### 3. 결론

현재 대전력 스위치로서 그 신뢰성을 인정받고 있는 Thyatron 스위치는 그 최대 전류가 아직 20 kA 수준에 머물러 있고 단위 펄스당 전하 전달량도 열화 방식의 음전극을 사용하는 관계로 수 coulomb 이하이다. Pseudospark 스위치는 이 Thyatron 스위치가 가지는 단점을 극복하기 위해 개발이 제안되고 있는 스위치로서 Thyatron 스위치의 단점을 상당 부분 극복할 수

있는 특성을 가진 동시에 빠른 동작 주파수와 긴 수명을 가지고 있다. 현재 제작된 Pseudospark 스위치의 특성 실험 결과, 스위칭전류는 4-gap 스위치 시스템의 25 kV의 방전전압 하에서 최대 전류 124 kA가 나왔으며 펄스 폭은 0.9  $\mu$ s정도의 값을 가진다. 제작된 Pseudospark 스위치는 대전류 스위치로서의 사용뿐만 아니라 anode로부터 나오는 전자빔을 이용하여, 박막 제작에 사용되는 전자빔 소스로도 사용이 가능하며 현재 연구 중에 있다. 자가방전(self-breakdown) 방식의 현재의 시스템의 개선으로 트리거의 제작, 외부 축 전기의 용량에 따른 스위칭전류와 전자빔 전류의 특성, 캡 수에 따른 전자빔의 전류밀도와 파워밀도의 변화 등 아직 많은 연구과제를 남겨두고 있다.

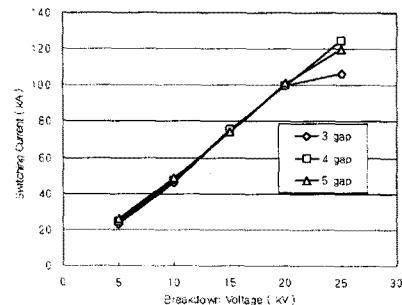


그림 7. Breakdown 전압과 스위칭전류

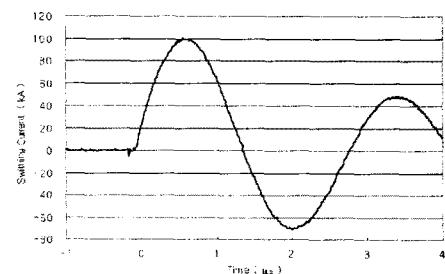


그림 8. 5 gap, 20 kV 의 breakdown 전압에 따른 switching current 과정

### 참 고 문 헌

- [1] K. Frank and J. Christansen : IEEE, Trans. on Plasma science, Vol. 17, No 5, October 1989.
- [2] W. Benker, J. Christansen, K. Frank : IEEE Trans. on Plasma science, Vol 17, No 5, October 1989
- [3] K. K. Jain, E. Boggasch, M. Reiser, M. J. Rhee, : Phys. Fluids B 2, (10), 1990.
- [4] Y. H. Lee: Master thesis, Pohang University of Sci. and Technol. 1993.
- [5] V. L. Granovsky, "Electrical Current in Gas. The Steady Current", Nauka, Moscow, 1971 in Russian.
- [6] J. M. Meek and J. D. Craggs, "Electrical Breakdown of Gases", Clarendon Press, Oxford, 1953.
- [7] D. Bloess, I. Kammer and H. Riege : Nucl. Instrum. Method. 205 (1983) 173.