

음펄스 전압회복에 따른 평판형 스위치 전극에 흐르는 전류의 거동 관찰

황휘동\*, 최재명\*\*, 고광철\*, 김근호\*\*  
 \*한양대학교 전기공학과, \*\*서울대학교 원자핵공학과

Current of planar switch during the recovering time of the negative pulse

Hui-Dong Hwang\*, James Choe\*\*, Kwang-Cheol Ko\*, and Gon-Ho Kim\*\*

\*Dept. of Electrical engineering, Hanyang University and \*\*Nuclear engineering, Seoul National

**Abstract** - 평판 스위치 전극에 인가되는 전압 변화에 따라서 전극 앞에서의 플라즈마 전위의 변화를 측정하고, 이를 이용하여 형성된 전계의 변화를 관찰하였다. 대부분 스위치 전극에 인가되는 펄스는 펄스 인가시간, 플레토(plateau)시간, 펄스 회복시간으로 구성되어 이들 세 가지 시간 구간에 따라서 전위의 변화를 측정하여 형성되는 전계를 관찰하였다. 빠른 방전 스위치의 동작특성을 이해하기 위하여 스위치 전극 인가 전압의 인가시간 변화와 이에 따른 전압 변화율 및 인가전압의 크기에 따른 플라즈마 쉬스의 거동을 관찰하고, 그 크기가 펄스 변화율과 크기에 따라 변화함을 찾았다.

펄스의 회복시간 동안에 돌아오는 플라즈마 쉬스의 거동은 펄스의 인가시간동안의 변화와 유사한 거동을 보였으며 이때에도 펄스 회복율이 중요한 인자임을 알 수 있었다. 만일 펄스 변화율이 커서, 전극 앞에서의 쉬스의 거동 속도가 플라즈마 이온의 음속보다 빠르게 변할 때는 이온 매트릭스 쉬스의 거동형태를 따르고, 변화율이 늦어서 쉬스의 거동 속도가 이온의 음속보다 느리게 변하는 경우에는 Child-Langmuir 쉬스의 형태가 시간에 따라 전개됨을 알 수 있었다. 펄스 특성을 정량적으로 관찰할 수 있도록 스위치 전극에 흐르는 전류의 크기를 계산하기 위해 필요한 모델을 개발하여 실험결과와의 비교를 통하여 펄스 시간동안 플라즈마의 거동이 스위치를 흐르는 전류에 미치는 영향을 연구하였다.

1. 서 론

대전력장치에 이용되고 있는 차단기와 갭 스위치 등에서 일어나는 방전현상을 이해하기 위해서, 전극에 인가되는 전압신호에 따라 전극 앞에 형성된 플라즈마 쉬스의 시간에 따른 전개 특성과 공간전계의 시간 변화 특성에 관한 연구는 필수적이다. 기존의 연구들은 스위치 전극 앞에 형성되어 전개되는 플라즈마 쉬스의 시간 변화 특성을 스위치 전극에 인가되는 전압 및 전류파형을 이용하여 간접적으로 해석하거나, [1, 2] 전자와 이온의 개별 거동을 추적하는 시뮬레이션을 통해 제한된 시간동안에 진행되는 공간전계를 관찰하였다.[3]

대부분 스위치 전극에 인가되는 전압의 특성은 오름시간, 플레토 시간과 내림 시간의 세 영역으로 펄스 시간을 정의할 수 있다. 따라서 각 영역에서 전극사이에 형성되는 공간 전계의 특성은 매우 다르게 됨으로 제한된 시간동안의 공간 전계의 측정은 스위칭 시간 전체에서 일어나는 현상을 이해하기에는 부족하다. 본 연구에서는 스위치 전극을 평판형으로 가정하고, 한쪽 전극에 펄스 전압을 인가하여 인가전압의 변화에 따른 전극 사이 공간에 형성되는 공간 전계의 변화를 관찰하였다. 이와 관련한 대부분의 연구는 펄스 인가시간에 집중되어 왔고, 펄스 회복시간에 대한 연구는 거의 이루어져 있지 않았다.[4]

본 논문에서는 펄스가 인가된 전극의 전압에 따라 전

극 앞에 형성된 플라즈마 쉬스의 거동을 관찰하였으며 펄스 오름 시간과 펄스 유지 시간에 대한 Kim등의 연구 결과를 검토하였다.[5] 아울러 스위치 전극에 전압이 인가되어 전극사이에 플라즈마가 형성되었다고 가정하였다. 스위치 전극의 전압이 회복되어 단락을 시도하는 경우의 스위치 특성을 관찰하기 위하여, 펄스 회복시간 동안에 형성되는 플라즈마 쉬스의 거동 및 전계의 변화를 관찰하였다. 이 결과들을 종합하여 전체 펄스 시간 동안의 플라즈마 쉬스의 거동과 전극에 흐르는 전류 신호에 대한 해석을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 쉬스 측정

그림 1은 본 실험장치의 개략도이다.

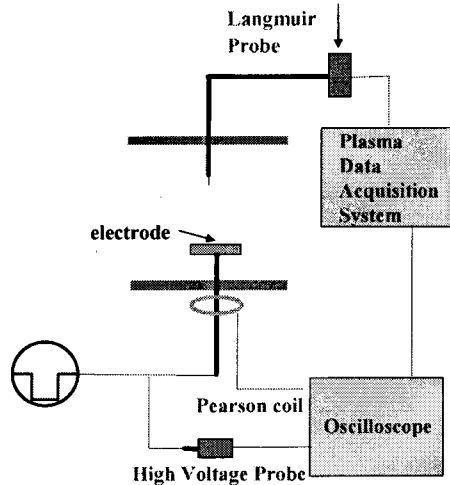


그림 1. 실험장치 개략도

공간전계의 분포를 측정하기 쉽게 하기위해 유도결합형 플라즈마 장치에서 플라즈마를 형성하였다. 스위치 전극을 모사하기 위해 플라즈마 내에 삽입한 전극은 100mm의 지름을 가지는 stainless steel 원판이고, 안테나의 방향과 수직으로 진공용기 내에 삽입하였다. 이 전극에 음펄스를 인가하고 정전 탐침을 이용하여 전극으로부터의 거리를 변화시키면서 전자전류를 정전 탐침을 이용하여 측정하고, 전극에 흐르는 전류는 pearson 코일을 이용하여 측정하였다.

아르곤 가스는 이온화될 때 Ar<sup>+</sup>가 형성됨으로 전하량에 의한 영향을 최소화하기 위해 본 실험에서는 아르곤 플라즈마를 이용하였다. 입자들의 충돌효과를 배제하기

위해 압력 1 mTorr의 낮은 압력을 유지하였으며 300w의 전력을 인가하여 전자온도 약 3.0 eV, 밀도 약  $6.9 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$  플라즈마를 유지하였다. 탐침은 전극으로부터 1cm에서 7cm까지 이동시키면서 측정하였다.

### 2.1.1 탐침신호

전극에 음펄스 전압이 인가되면, 플라즈마 쉬스 경계는 전극으로부터 멀어지게 된다. 쉬스 경계가 탐침을 지날 때 탐침에 흐르는 전류가 변화 한다. 이때 전류의 변화는 초기의 반응이 빠른 전자전류에서 플라즈마 쉬스내의 이온에 의한 이온전류로 전류의 방향이 바뀌게 된다. 따라서 전류 파형의 첫 번째 굴곡점을 쉬스의 경계가 지나가는 지점으로 고려할 수 있다. 플레토 시간이 지나면 전개되어 있던 쉬스는 다시 전극으로 돌아오게 된다. 되돌아 오는 쉬스가 탐침이 위치한 영역에 도착하면 탐침으로 들어가는 전자의 수가 증가하여 전류는 다시 음으로 증가하게 된다. 그러므로 두 번째 굴곡점은 되돌아오는 쉬스가 그 위치를 지날 때의 시간을 의미한다.

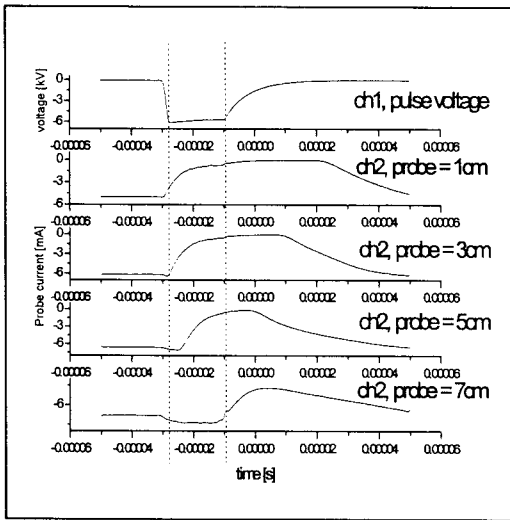


그림 2. 그림 2 채널1은 인가전압이며 채널2는 전극으로 1, 3, 5, 및 7cm에 놓여 있는 탐침에서 얻어진 전류곡선

그림2에 전극으로부터의 거리가 각각 1, 3, 5, 7cm일 때 측정된 플라즈마 전류의 시간에 따른 변화이다. 그림에서 점선으로 표시된 부분은 펄스의 인가시간이 끝나는 시간과 회복시간이 시작되는 시간을 의미한다.

### 2.1.2 쉬스 위치

그림 3은 탐침에서 측정된 전자전류의 굴곡점을 이용하여 측정된 쉬스의 위치를 시간에 따라 표시한 그림이다. 펄스 인가시간동안 전압 상승률이 높으므로 쉬스 역시 빠른 속도로 전개하다가 플레토 시간이 되면 전압이 일정하므로 쉬스의 속도는 이온 음속으로 변화하고 Child-Langmuir 쉬스로 안정화한다. C 위치에서 쉬스는 더 이상 전개하지 않고 회복시간이 시작되면서 전극으로 다시 돌아오기 시작한다. 펄스 인가시 발생된 이온 소리 파동은 이온 음속으로 계속 진행하고 있다.[5] 펄스의 최고값에 도달하기까지 걸리는 인가시간을 변화 시키거나 펄스 인가 전압값을 변화시킬 때 쉬스의 거동에 관한 연구가 Kim 등에 의해 수행되었다.[5]

그림 3에서 점선은 회복시간의 시작 시간을 의미하고 가는 실선은 빠른 변화 영역과 느린 변화 영역의 경계를 나타낸다. 주어진 시간동안 쉬스의 전개 거리를 S라고 두고 이 때 쉬스의 속도를  $u_s$ 라 두면 쉬스의 전개 시간은  $t_s = S/u_s$ 가 된다. 이온 Bohm 속도를  $u_B$ 라 하고

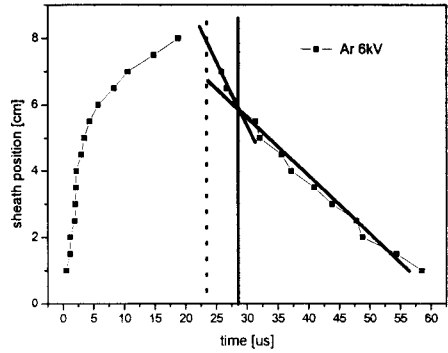


그림 3. 시간에 따른 전극에서부터 쉬스의 위치 : 기체-Ar, 펄스전압-6kV, 펄스폭-30us, 입력전력-300w, 압력-1mTorr

$\tau = S/u_B$ 라 두면,  $t_s < \tau$ 일 때 쉬스의 속도가 이온 Bohm 속도보다 빠르므로 빠른 변화영역을 의미한다.  $t_s > \tau$ 이면 쉬스의 속도는 이온 Bohm 속도보다 느리므로 느린 변화 영역을 의미하게 된다.

### 2.2 전류모델

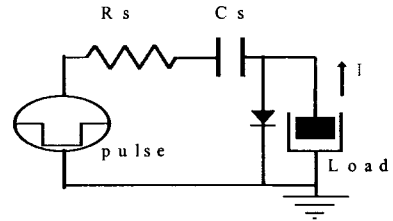


그림 5. 펄스 발생기의 간략화 회로

전극에 인가되는 음펄스 전압은 외부 펄스 발생기로부터 인가된다. 그림 4는 외부 펄스 발생기의 회로도이다. IGBT를 이용한 전압 스위칭회로를 이용하여 구동시킨 진공관 스위치를 이용하여 음펄스 전압을 발생시킨다. 펄스 발생기는 하나의 펄스전원과 R과 C를 가지는 회로로 등가화 시킬 수 있다. 여기에 진공용기와 내부에 삽입된 전극 사이에 존재하는 R과C를 중첩시켜서 하나의  $R_s$ 와  $C_s$ 로 간략화한 등가회로를 그림 4에 나타내었다. 이  $R_s$ ,  $C_s$ 의 영향으로 인해 펄스는 그림 5와 같이 상승시간과 회복시간을 가지게 된다.

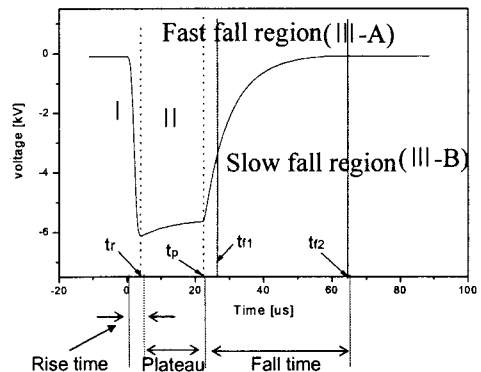


그림 3. 인가 펄스의 3단계(6kV), 회복시간을 빠른 변화 영역과 느린 변화영역으로 나눔

인가 펄스 전압은 인가시간동안(그림 5.(I)) 선형적으로 증가하고 [5], 플레토 시간동안의 전압 변화량은 전체 펄스 전압과 비교하여 일정하다고 볼 수 있다.(II). 펄스 회복시간 초기에는 인가시간과 마찬가지로 선형적인 변화를 보이고, 그 시간이 이후에는 지수 함수적으로 증가한다. 본 논문에서는 그림 3에서 제시한 바와 같이 Bohm 속도를 기준으로 회복시간을 2영역으로 나누어 빠른 변화 영역(III-A)과 느린 변화 영역(III-B)이라 하였다. 이들 4영역에서의 전압은 각각 식(1)과 같이 근사화할 수 있다.

$$\frac{V_0}{t_r} t \quad (I)$$

$$V_0 \quad (II)$$

$$\frac{(V_0 - V(t_A))(t_A - t)}{t_p - t_A} \quad (III-A)$$

$$V(t) = \begin{cases} \frac{(V_0 - V(t_A))(t_A - t)}{t_p - t_A} & (I) \\ V(t_A) e^{-\frac{1}{R_s C_s}(t - t_A)} + V_f & (III-B) \end{cases} \quad (1)$$

$$V(t_A) e^{-\frac{1}{R_s C_s}(t - t_A)} + V_f \quad (III-B)$$

$V_0$ 는 인가 펄스 전압이고,  $t_r$ 은 인가시간이 끝나는 시간 이므로  $V_0/t_r$ 은 인가전압의 변화율이다.  $t_p$ 는 플레토영역이 끝나는 시간이고,  $t_A$ 는 회복시간 중 빠른 변화 구간에서 느린 변화 구간으로 바뀌는 시간을 나타내고 그 순간 전압은  $V(t_A)$ 이다.  $t_{r2}$ 는 펄스가 끝나는 시간이며  $V_f$ 는 지수함수로 근사화 시킬 때 나타나는 offset 값이므로 이상적인 값은 영이다.  $R_s$ ,  $C_s$ 는 외부회로에 의해 결정되는 상수이다.

전극을 통과하는 전류밀도는 쉬스를 통과하는 전류밀도와 같으므로 전극에 흐르는 전류밀도는 다음과 같다.

$$J_F = qn_e v_{sh} = qn_e \frac{d}{dt} S_{sh} \quad (2)$$

이를 이용하면 펄스시간에 따른 전류밀도의 크기는 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} \left( \frac{2\epsilon_0 V_0}{en_e t_r} \right)^{1/2} t^{-1/2} + u_B \quad (1)$$

$$n_e q \sqrt{\frac{T_e}{M_i}} \quad (II)$$

$$J_F = \begin{cases} \frac{1}{2} qn_e \left( \frac{2\epsilon_0 V_0}{en_e t_r} \right)^{1/2} (t_A - t)^{-1/2} - u_B & (III-A) \\ 12496 q \sqrt{n_e T_e^{-1/4}} \frac{V(t_A)}{R_s C_s} e^{-\frac{1}{R_s C_s}(t - t_A)} & (III-B) \end{cases} \quad (3)$$

쉬스를 통과하는 이온의 상대 속도는 쉬스가 전개해 나가는 속도에 Bohm 속도가 더해져야하지만, Kim등의 연구에서 알 수 있듯이 빠른 인가시간동안 이온 매트릭스 쉬스가 전개하므로 쉬스의 속도는 Bohm 속도보다 훨씬 빠르다. 그러므로 식(3)의 계산에서 Bohm 속도를 의미하는  $u_B$ 를 생략할 수 있다.[5] 플레토 시간동안 전압이 일정하다고 가정했으므로 쉬스가 Child-Langmuir 쉬스가 되기 전까지 Bohm 속도를 가짐을 알 수 있다. 쉬스가 돌아오는 시간의 빠른 변화 영역(그림 5.(III-A))에서 쉬스는 인가시간의 이온매트릭스 쉬스모델과 유사한 거동을 보이므로 이온의 질량과 상관없이 플라즈마 밀도와 인가시간의 1/2승에 반비례함을 알 수 있다. 느린 변화 영역(그림 5.(III-B))에서는 이온이 충분히 쉬스의 변화에 반응하므로 쉬스의 속도를 Bohm 속도로 가정하여 계산할 수 있다.

음펄스 전압을 인가했을 때 전극에 흐르는 전류의 측정값과 전류 계산 결과를 그림 6에 나타내었다. 식 (3)을 이용하여 계산한 전체 펄스 시간동안의 전류를 점선으로

표시하였다. 펄스가 인가되면 순간적인 전압 변화율이 높아 전류가 크게 증가하지만 쉬스가 전개하면서 그 속도는 점점 감소하여 Bohm 속도에 가까워 지게 된다.[5] 그러므로 전류는 감소하다가 쉬스의 속도가 Bohm 속도와 같아지면 Child-Langmuir 전류로 일정하게 된다.

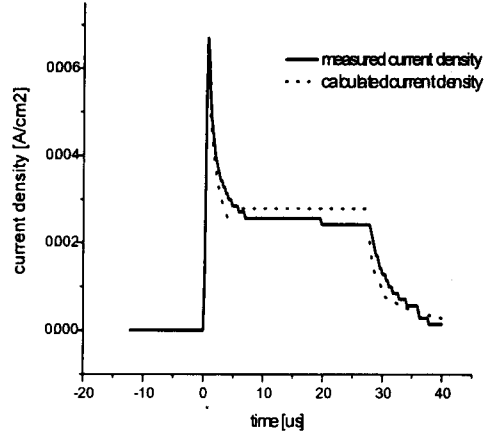


그림 6. 전극에 흐르는 전류밀도. 전압 2kV, 펄스 폭 30µs

회복시간의 빠른 변화 영역에서는 전압의 변화율이 크므로 쉬스 역시 전극으로 빠르게 돌아오고 전류의 변화율이 크고 느린 변화영역에서는 전류의 변화율이 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 쉬스의 전개 결과를 이용하면 전극의 전류를 정량화할 수 있고 또한 전극을 통하여 외부회로로 공급되는 펄스 당 전력을 구할 수 있다.

### 3. 결 론

스위치 전극을 모사한 평판형 전극에 음펄스 전압을 인가했을 때 전극 부근의 쉬스 전개를 측정하여 전류를 계산하였다. 펄스의 변화율이 빨라서 전극 근처 이온의 반응속도가 이온 음속에 비해 큰 경우 빠른 쉬스 전개에 의해 전류는 급격히 변화한다. 플레토 시간동안에는 쉬스가 안정화하고 전류는 정상상태를 유지한다. 펄스 회복 시간 초기, 빠른 변화 영역에서는 인가 시간에서와 마찬가지로 쉬스전개 속도는 전압변화에 민감하게 반응하여 전류는 급격하게 변화한다. 느린 변화 영역이 되면 전압은 회로상의 RC영향으로 변화율이 감소하고 이로 인해 이온이 충분히 반응하면서 전극으로 되돌아오는 쉬스는 Child-Langmuir 쉬스가 된다. 이러한 쉬스의 거동들은 그 쉬스가 속한 플라즈마의 인자들에 의해 결정된다. 따라서 스위치의 소거 시간동안 전극을 흐르는 전류는 발생된 플라즈마의 거동에 의해 받는 영향이 크다.

### [참 고 문 헌]

- [1] G. I. Dolgachev, et al, "Current propagation between a plasma opening switch and a load during opening", Pulsed Power Plasma Science, Vol 2, 1440-1443, 2001
- [2] Geun-Hie Rim, "Design and Testing of a Rotary Arc Gap-Switch for Pulsed Power", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. 28, 1491-1496, 2000
- [3] R. L. Bowers et al, "Effects of Plasma Surface Layers on the Efficiency of Plasma Flow Switching", IEEE Trans. on Plasma Sci., Vol. 26, p1420-1437, 1998
- [4] J.R. Conrad, J.L. Radtke, R.A. Dodd, F.J. worzala, N. C. Tran, "Plasma source ion-implantation technique for surface modification of materials.", J. Appl. phys. 62, 4591(1987)
- [5] G-H. Kim, Y-W kim, S. Han, H-S. Uhm, J. Cho, M J J ung, and MP Hong, "Measurement of expanding plasma sheath from a target biased by a negative pulse with a fast rise time", J. Appl. Phys. 93, 1384 (2003)