

## PSII 펄스 시스템의 동적 플라즈마 부하 회로 모델 개발

정경재<sup>1\*</sup> · 최재명<sup>1</sup> · 황휘동<sup>2</sup> · 김근호<sup>1</sup> · 고광철<sup>2</sup> · 황용석<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 원자핵공학과, 서울 151-742

<sup>2</sup>한양대학교 전기공학과, 서울 133-791

(2006년 3월 9일 받음)

음의 고전압의 인가에 따라 반응하는 동적 플라즈마를 부하로 갖는 PSII(plasma source ion implantation) 펄스 시스템을 분석하기 위한 회로 모델을 개발하였다. 플라즈마 내에 삽입된 평판 전극 앞에서의 플라즈마 쉬스의 움직임은 동적 차일드-랑뮤어 쉬스 모델을 따르는 것으로 가정하였다. 표적 전극에 흐르는 전류는 전극에 인가되는 전압과 서로 영향을 주며 변화하므로 동적 플라즈마 부하를 전압 의존 전류 원으로 표현하여 자기모순이 없는 회로 모델을 구현하였다. 회로 해석은 Pspice 프로그램을 이용하여 수행하였으며, 다양한 플라즈마 조건과 펄스 인가 조건에서의 실험 결과와 비교하여 회로 모델의 타당성을 검증하였다.

주제어 : 플라즈마 쉬스, 펄스 시스템, 회로 모델, PSII

### 1. 서 론

전기 전도도가 높은 플라즈마 부하(load)를 갖는 고전압 펄스 시스템의 운전 특성은 방전 플라즈마의 동특성에 따라 변한다. 예로서 일반적인 플라즈마 부하로는 퓨즈와 고전압 방전 스위치, 공정용 저온 플라즈마 등이 있다. 과전류 차단 또는 고전압 발생을 위한 퓨즈의 성능은 순간적으로 발생하는 플라즈마의 소호 시간에 의하여 결정되며[1], 고전압 방전 스위치는 방전관 내부에서 생성되는 플라즈마의 발생 및 소호 특성에 따라 지연 시간(delay time), 지터(jitter), 최대 운전 주파수 등이 결정 된다[2]. 특히, 물질 표면의 개질용으로 이용되는 플라즈마원 이온주입(plasma source ion implantation: PSII) 기술은 플라즈마 내에 도체 혹은 부도체 표적(target)을 삽입한 후 음의 고전압 펄스를 인가하여 물질 표면에 이온을 주입하는 기술로서, 복잡하게 상호 반응하는 표적 펄스 전압과 플라즈마의 임피던스에 따라 주입되는 이온 전류를 세밀히 조절해야 한다[3]. 따라서 플라즈마를 부하로 가지는 펄스 시스템의 성능을 향상시키기 위해 전원 장치의 구동 특성과 플라즈마 부하의 특성을 함께 고려한 펄스 시스템의 해석이 필요하다.

PSII 기술에 있어서, 표적에 인가되는 고전압 펄

스는 펄스가 커지는 펄스 오름시간, 펄스 유지시간, 전원 공급이 중단된 후에 형성되는 펄스 내림시간 영역으로 구성된다. 펄스 시스템의 인가전압에 대한 응답 특성인 플라즈마 부하 임피던스는 플라즈마 쉬스(plasma sheath)를 통하여 입사되는 이온 전류와 표적에 인가되는 전압의 관계로부터 정의된다. 따라서 펄스의 각 시간 구간에서 다르게 형성되는 플라즈마 쉬스는 복잡한 양상을 띠게 되며, 효율적인 표면 처리를 위한 PSII 펄스 시스템의 개발을 위해 비선형적인 동적 특성(dynamic characteristics)을 모사할 수 있는 플라즈마 부하 임피던스 모델의 확립이 필수적이다.

일반적으로 펄스 전원과 표적 부하의 임피던스는 각각 독립적 인자로 가정하고, 전원으로부터 인가되는 전압 파형을 기준으로 플라즈마의 동적 모델을 이용하여 쉬스의 거동 및 표적으로 입사되는 표적 전류를 얻는다[4-6]. 하지만, 대부분의 기존 펄스 시스템은 용량성 에너지 저장방식(축전기 방전 형태)으로 플라즈마 쉬스를 통하여 표적에 유입되는 전하들은 펄스 시스템의 축전기 전압에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 부하의 특성은 표적의 방전 전압에 다시 영향을 미치게 되므로 펄스 전원과 부하의 임피던스는 서로 독립적이지 않게 된다.

본 연구에서는 플라즈마 부하를 펄스 시스템의

\* [전자우편] pulseman@bclinc.com

일부로서 가정하여 회로 모델을 개발하고 부하의 특성에 따른 펄스 시스템의 거동을 관찰하였다. 표적 앞에 형성되는 플라즈마 쉬스는 차일드-랑뮤어 법칙(Child-Langmuir law)을 따르는 것으로 가정하였으며 펄스 구간에 따라 표적에 입사되는 표적 전류와 인가 전압간의 상호관계를 만족시키도록 하였다. 표적의 펄스 전압과 전류의 관계로부터 비선형 부하 특성을 모사하고 이를 펄스 회로의 일부로 포함하여 전체 펄스 시스템의 회로를 일체화하였다. Pspice 프로그램[7]을 이용해서 동적 플라즈마 부하를 포함하는 전체 펄스 시스템의 회로 모델을 구현하였으며, 본 모델의 타당성을 검증하기 위하여 펄스 구간에 따른 인가전압 및 전류 값을 다양한 조건에서의 실험값과 비교하였다.

## II. 펄스 시스템

본 연구에서 사용된 펄스 시스템의 전체 회로도 는 그림 1과 같다. 펄스 전원의 에너지 저장장치로는 0.1  $\mu\text{F}$ 의 전기용량(capacitance)을 갖는 저 인덕턴스 축전기(NWL사, 모델: 11125)를 사용하였다(그림1의  $C_1$ ). 주 축전기( $C_1$ )는 고전압 직류 전원(Convertech사, 모델: SHV300RD-60K)에 의하여 충전되고 고전압 전력소자 스위치(Behlke사, 모델: 151-B)를 통하여 부하로 방전하게 된다. 스위치가 갖는 고유 전기용량 성분  $C_n$ 과  $C_p$ 는 각각 39 pF 및 20 pF으로, 제작사로부터 제공된 특성 값[8]과 부하 단락 실험과의 비교를 통하여 얻은 값을 사용하였다[9]. 스위치의 보호를 위하여 주 축전기와 스위치 사이에 2 k $\Omega$ 의 값을 갖는 전류제한용 저항( $R_1$ )을 연결하였으며, 펄스 전압의 오름 시간과 내림 시간을 인위적으로 조절하기 위하여 파형조절용 전기용

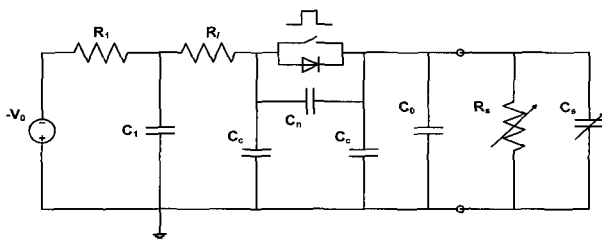


그림 1. 플라즈마 부하를 갖는 펄스 시스템의 등가 회로

량  $C_0$ 를 부하와 병렬로 연결하였다. 플라즈마 부하의 등가회로는 그림 1의 오른쪽에 표시한 바와 같이 가변 저항( $R_s$ )과 가변 전기용량( $C_s$ )으로 나타내었으며, 가변 값은 플라즈마 쉬스의 등가 저항과 전기용량의 동적 특성을 의미한다. 파형조절용 전기용량  $C_0$ 의 값이 충분히 커서 펄스 전압의 시간에 따른 변화가 상대적으로 작은 경우에는 플라즈마 쉬스의 전기용량 성분에 의한 변위 전류는 무시할 수 있으므로, 본 연구에서는 동적 플라즈마 부하의 임피던스는 순수한 저항 성분만으로 표현된다고 가정하였다 (쉬스 전기용량 성분의 영향은 3장의 그림 9 설명 참조). 따라서 부하에 걸리는 전압의 크기는 충전 전원에 의하여 조절되고 스위치의 개폐 조작에 따라서 펄스 전위가 부하 단에 걸리게 되거나 전원공급이 차단되며, 펄스의 전압 파형은 파형조절용 전기용량  $C_0$ 에 의하여 제어가 가능하도록 하였다. 스위치 개폐를 위해서는 외부의 펄스 발생기로부터 5 V의 펄스 입력 신호를 이용하였다.

그림 2는 펄스 시스템의 부하로서의 플라즈마를 발생시키기 위한 반응기의 개략도이다. 지름 50 cm, 길이 60 cm의 원통형 진공함의 한쪽 면에 위치한 고주파 안테나에 13.56 MHz의 고주파를 인가하여 플라즈마를 발생시키며, 발생된 플라즈마는 표적 쪽으로 확산된다. 사용된 표적의 재질은 스테인리스 스틸이며, 지름은 10 cm이다. 표적 반대쪽으로부터의 전류 유입을 차단하기 위하여 한 쪽 면을 절연시켰으며, 고전압의 인가에 의한 플라즈마 쉬스의 형상을 그림에 점선으로 표시하였다. LP1과 LP2는 각각 Z-방향과 R-방향의 플라즈마 특성을 파악하기 위한 랭뮤어 프로브를 나타내며, 이를 통해 입력 고주파 전력에 따른 플라즈마의 밀도 및 온도를 측정하였다[9].

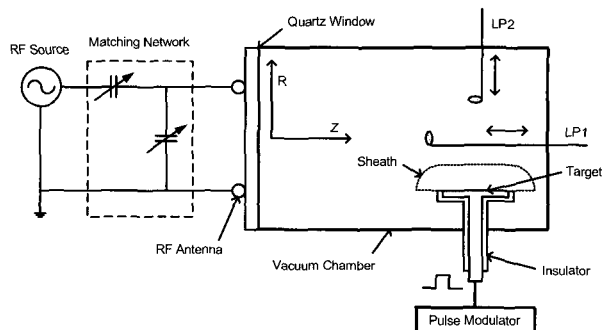


그림 2. 플라즈마 발생 장치의 개략도

## 2.1 동적 플라즈마 부하의 임피던스

동적 플라즈마 부하의 임피던스를 모의하기 위해서 표적에 인가되는 전압과 표적에 흐르는 전류와의 상관관계를 고려하였다. 표적 전류는 표적 앞에 형성되는 쉬스를 통하여 입사되는 이온에 의한 전류와 높은 에너지의 입사 이온에 의한 이차전자 방출전류로 구성된다. 먼저 표적 앞에 형성되는 쉬스를 다음과 같이 가정하였다.

원형 평판 표적에 음의 고전압이 인가될 경우를 가정하여[10] 표적 앞에서의 플라즈마의 거동을 펄스 오름시간 동안에는 동적 쉬스 모델(dynamic sheath model)을 적용하고, 펄스 유지시간과 펄스 전위가 매우 천천히 변하는 펄스 내림시간 동안에는 정상 상태 쉬스 모델(steady-state sheath model)을 가정하였다. 쉬스 경계(sheath edge)의 위치  $s$ 를 통해 흐르는 이온 전류 밀도  $J_c$ 는 일반적으로 표적에 인가된 전압의 크기  $V$ 에 따라 아래와 같은 형태의 공간전하제한 전류밀도(space-charge-limited current density)를 갖는다고 알려져 있다[11].

$$J_c = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left( \frac{2e}{M} \right)^{1/2} \frac{V^{3/2}}{s^2} \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_0$ 는 진공 중에서의 유전율,  $e$ 와  $M$ 은 각각 이온의 전하와 질량을 나타낸다.

표적에 음 전위가 크게 인가되는 경우 형성되는 플라즈마 쉬스의 크기는 매우 커지면서 표적 앞의 플라즈마 밀도 분포에 의해 그 전개는 영향을 받는다. 또한 표적 크기에 비해서 크게 전개되는 쉬스는 표적의 가장자리를 감싸면서 점차 구형의 형태를 갖게 된다. 따라서 표적 앞에 얇게 형성된 쉬스의 1차원 모델은 표적 가장자리까지의 전개(이하 가장자리 효과)를 포함하는 2차원 모델로 확대하여야 한다[10]. 기존의 쉬스 모델들은 균일한 밀도 분포를 가정하였으나 실제 전극 앞에서는 플라즈마의 확산에 의한 분포를 가지므로[9], 본 연구에서는 전극 앞의 불균일한 플라즈마 밀도 분포를 고려한 쉬스 모델을 사용하였다. 또한 금속 표면에 입사되는 이온에 의한 이차전자 방출 크기는 입사되는 이온의 에너지에 비례한다고 가정하였다.

이온 전류를 계산하기 위해서 가장자리 효과가 고려된 두께  $s$ 의 쉬스 경계면이 만드는 면적은 부

록 A.1에서와 같은 방법으로 계산하여 아래 식 (2)에 보였다. 인가전압에 따른 표적 전류  $I(V)$ 는 이온 전류  $I_i$ 와 이차전자 전류  $I_e$ 의 합으로 나타나며, 식의 오른쪽 항의  $\pi R^2$ 은 표적 전극의 기하학적 면적,  $2\pi s^2 + \pi^2 R s$ 는 전극 주변으로 가장자리 효과에 의해 확장된 쉬스 경계 면적을 의미한다.

$$I(V) = I_i + I_e = (1 + \gamma_0 V^{1/2})(2\pi s^2 + \pi^2 R s + \pi R^2) J_i \quad (2)$$

여기서,  $\gamma_0$ 는 이온 충돌에 의한 이차전자 방출 계수이며[12],  $R$ 은 원형 표적의 반지름,  $J_i$ 는 플라즈마로부터 들어오는 이온의 전류 밀도이다.

### 2.1.1 펄스 오름시간 (Pulse Rise Time)

대부분 표적에 인가되는 펄스는 시스템이 갖는 시정수(RC time)에 의해 펄스 오름시간, 유지시간과 내림시간을 갖는다. 펄스 인가 초기의 펄스 오름시간 (주로 주 축전기와 전류제한용 저항, 파형조절용 전기용량에 의해 결정) 동안에 전개하는 쉬스 경계로부터 입사되는 이온의 전류 밀도는 쉬스의 팽창 속도에 비례하며 표적 앞의 밀도 분포에 비례하여 다음과 같이 정의할 수 있다[13].

$$J_i = n_0 e \frac{ds}{dt} = \alpha s^{1/2} e \frac{ds}{dt} \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 전극으로부터의 거리에 따른 플라즈마의 밀도 분포의 비례 상수로서, 실험 결과를 바탕으로 쉬스 경계 위치  $s$ 에 따라서 다음과 같은 식으로 근사하였다[10].

$$n_0(s) = \alpha s^{1/2} \quad (4)$$

따라서 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 펄스 오름시간 동안 전압에 따라 쉬스 경계면을 통하여 표적에 유입되는 전류의 크기는 다음과 같다.

$$I(V) = (1 + \gamma_0 V^{1/2})(2\pi s^2 + \pi^2 R s + \pi R^2)(\alpha s^{1/2} e \frac{ds}{dt}) \quad (5)$$

여기서, 쉬스의 크기 혹은 쉬스의 경계 위치  $s$ 는

식 (1)과 식 (3)으로부터 다음과 같이 정리된다.

$$s(V) = 1.13 \left( \frac{\epsilon_0}{\alpha e} \right)^{2/7} \left( \frac{2e}{M} \right)^{1/7} \left( \int_0^t V^{3/2} dt \right)^{2/7}. \quad (6)$$

이 관계식을 식 (5)에 적용하면 펄스 시스템 내의 전압과 전류의 관계를 자기모순이 없이 (self-consistent) 얻을 수 있게 된다.

### 2.1.2 펄스 유지 및 내림시간 (pulse plateau and fall times)

전압 펄스는 급격히 변하는 펄스 오름시간 이후에 안정적인 인가전압이 유지되는 펄스 유지시간의 구간을 갖는다. 대부분의 펄스 유지시간 동안에 전압은 이온 거동 시간보다 충분히 긴 시간 동안 크게 변하지 않고 유지되고 있으므로, 표적 전위에 따라 안정적인 플라즈마 쉬스인 차일드-랑뮤어 쉬스(Child-Langmuir sheath)가 형성된다고 가정할 수 있다. 이 경우 쉬스 경계면을 통하여 유입되는 이온의 전류 밀도는 다음과 같은 봄(Bohm) 전류 밀도 크기를 갖는다[11].

$$J_i = n_s e v_B = 0.6 \alpha s^{1/2} e \left( \frac{k T_e}{M} \right)^{1/2} \quad (7)$$

여기서,  $v_B$ 는 봄 속도(이온 음속도 =  $(kT_e/M)^{1/2}$ )이며,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $T_e$ 는 전자 온도이다.  $n_s$ 는 쉬스 경계면에서의 플라즈마 밀도로서 프리쉬스(presheath)를 고려하면 공간 밀도의 약 60% 값인  $n_s = 0.6 n_0$ 를 갖는다[11]. 이 가정과 식 (2)로부터 펄스 유지시간 동안의 표적 전류를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I(V) = (1 + \gamma_0 V^{1/2})(2\pi s^2 + \pi^2 R s + \pi R^2)(0.6 \alpha s^{1/2} e \left( \frac{k T_e}{M} \right)^{1/2}) \quad (8)$$

여기서, 쉬스의 위치  $s$ 는 식 (1)과 식 (7)로부터 다음과 같이 구할 수 있으며, 이 식은 표적 앞에서의 플라즈마 밀도 분포를 고려한 차일드-랑뮤어 쉬스 크기를 나타낸다.

$$s(V) = 0.89 \left( \frac{\epsilon_0}{\alpha e} \right)^{2/5} \left( \frac{2e}{k T_e} \right)^{1/5} V^{3/5}. \quad (9)$$

전압 펄스의 일정 전압 유지시간의 종료 후 이어지는 펄스 내림시간 동안의 쉬스의 거동에 대해서는 깊이 있게 연구되어 있지 않다. 단지 무한히 빠른 펄스의 차단에 대하여 Wood는 쉬스 안의 플라즈마 결핍 영역(depleted region)으로 채워지는 이온의 선속(flux)은 양극성 확산(ambipolar diffusion)에 따라 이온의 열 속도(thermal velocity)를 가지며 진행할 것을 예상하고 있다[14]. 하지만 대부분의 펄스 시스템은 펄스 전원 고유의 임피던스와 플라즈마의 임피던스의 조합에 의하여 결정되는 유한한 크기의 펄스 내림시간을 가지므로 Wood 모델의 적용은 한계를 갖는다. 본 연구에서는 펄스 시스템의 임피던스 성분(큰 값의 파형조절용 전기용량과 플라즈마 쉬스의 저항) 때문에 펄스 전압의 감소가 충분히 느리게 진행되어 차일드-랑뮤어 쉬스를 만족하는 경우로 가정하고 회로 모델을 완성하였다. 따라서 펄스 유지시간의 경우와 같이 쉬스 경계면에서 식 (7)의 봄(Bohm) 전류를 만족한다고 가정하였다. 특히 그림 1의 파형조절용 전기용량  $C_0$  값을 조절하여 펄스 내림시간을 늦출 수 있으며, 본 연구에서는  $C_0$ 의 변화에 따른 표적 전류 측정 결과와 본 모델에서 얻은 전류를 비교함으로써 모델의 타당성을 검증하였다(3장 참조).

### 2.1.3 동적 플라즈마 부하의 임피던스

전압 펄스 인가시간 동안의 전류-전압 특성은 펄스 오름시간에서 얻은 전류 식 (5)와 펄스 유지 및 내림시간의 전류 식 (7)을 이용하여 전체 펄스 구간에서의 표적 전압  $V$ 에 따른 쉬스의 임피던스  $Z(V)$ 를 다음과 같이 구하였다.

$$Z(V) = \begin{cases} \frac{V}{(1 + \gamma_0 V^{1/2})(2\pi s^2 + \pi^2 R s + \pi R^2)(\alpha s^{1/2} e \frac{ds}{dt})}, & \text{for } s < s_c \\ \frac{V}{(1 + \gamma_0 V^{1/2})(2\pi s^2 + \pi^2 R s + \pi R^2)(0.6 \alpha s^{1/2} e \left( \frac{k T_e}{M} \right)^{1/2})}, & \text{for } s \geq s_c \end{cases} \quad (10)$$

여기서,  $s_c$ 는 인가된 전압에 대하여 정상 상태에서의 차일드-랑뮤어 쉬스를 만족하는 쉬스의 크기이며, 식 (6)에서 시간에 따라 증가하는 쉬스 크기  $s$ 가 식 (9)에서 얻은 쉬스 크기와 같아지는 지점이다. 펄스 시간에 따라 각 펄스 구간에서 적용된 지배 방정식과 쉬스의 크기 및 전류-전압 특성을 표 1에 정리하였다.

표 1. 펄스의 각 영역에 적용된 모델과 쉬스의 크기 및 전류-전압 특성

|                         |          |   |
|-------------------------|----------|---|
| 펄스 오름시간                 | 이온전류 방정식 | $\alpha s^{1/2} e \frac{ds}{dt} = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left( \frac{2e}{M} \right)^{1/2} \frac{V^{3/2}}{s^2}$                           |
|                         | 쉬스의 크기   | $s(V) = 1.13 \left( \frac{\epsilon_0}{\alpha e} \right)^{2/7} \left( \frac{2e}{M} \right)^{1/7} \left( \int_0^t V^{3/2} dt \right)^{2/7}$ |
|                         | 전류-전압 특성 | $I(V) = (1 + \gamma_0 V^{1/2}) (2\pi s^2 + \pi^2 R s + \pi R^2) (\alpha s^{1/2} e \frac{ds}{dt})$   |
| 펄스 유지시간<br>및<br>펄스 내림시간 | 이온전류 방정식 | $0.6 \alpha s^{1/2} e \left( \frac{kT_e}{M} \right)^{1/2} = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left( \frac{2e}{M} \right)^{1/2} \frac{V^{3/2}}{s^2}$ |
|                         | 쉬스의 크기   | $s(V) = 0.89 \left( \frac{\epsilon_0}{\alpha e} \right)^{2/5} \left( \frac{2e}{kT_e} \right)^{1/5} V^{3/5}$                               |
|                         | 전류-전압 특성 | $I(V) = (1 + \gamma_0 V^{1/2}) (2\pi s^2 + \pi^2 R s + \pi R^2) (0.6 \alpha s^{1/2} e \left( \frac{kT_e}{M} \right)^{1/2})$               |

그림 3은 펄스 유지시간 및 내림시간 동안의 표적 전압에 따른 부하 임피던스 변화(식 (10)의 아래 식)를 고주파 전력의 크기에 따른 두 가지의 플라즈마 밀도 조건( $\alpha$ 의 변화: 그림 2의 LP2로 측정함)에 대하여 그린 것이다. 이 때의 쉬스 임피던스는 시간에 무관하며, 인가된 전압 및 플라즈마의 특성에 의존한다. 플라즈마 부하의 임피던스는 표적 전압에 따라 증가하다가 최대값을 갖고, 그 이후에는 천천히 감소하는 비선형적인 경향을 보인다. 또한 플라즈마 밀도가 증가할수록( $\alpha$ 값이 증가할수록) 전기 전도도가 높아지므로 플라즈마 부하의 임피던스가 낮아지고 있음을 볼 수 있다.

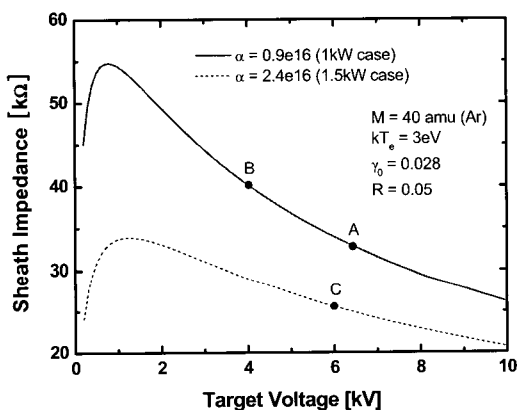


그림 3. 표적 전압과 플라즈마 밀도에 따른 쉬스 임피던스의 변화 (펄스 유지 및 내림시간)

## 2.2 펄스 시스템 회로 해석 프로그램

그림 1의 펄스 시스템의 회로 해석을 위해

Pspice 회로 해석 프로그램[7]을 이용하여 그림 4와 같은 모델을 작성하였다. 반도체 스위치의 구동에 따른 펄스 인가 시간  $t_p$ 는 각각 닫힘 스위치(U1)와 열림 스위치(U2) 소자를 이용하여 구현하였으며, 비선형 부하를 제외한 나머지 수동 소자의 구성은 그림 1과 동일하다. 그림 4의 펄스 시스템은 충전 전원(V1), 주 축전기(C1), 전류제한용 저항( $R_L$ ), 펄스 스위치, 파형조절용 전기용량( $C_0$ ) 및 부하 등으로 이루어져 있다. 충전 전원과 주 축전기는 부하에 걸리는 전압 크기를 결정할 뿐 아니라 펄스 방전동안 부하로 방전되는 전기 에너지를 보충하는 역할을 한다. 그림 4의 R1은 충전 전원(V1)의 용량을 조절하기 위해 사용되었으며, 주 축전기의 전기 용량은 0.1  $\mu$ F이다. 따라서 R1의 값이 작아진다면 DC 충전 전원의 용량이 큰 것을 의미하고, 같은 전압에서 C1이 증가할수록 펄스 전원의 용량은 증가하여 표적전압을 더 일정하게 유지시킨다.

Pspice의 프로그램 라이브러리에서는 비선형 수동 소자를 제공하지 않으므로 식 (10)에 해당하는 비선형 부하를 구현하기 위하여 전압 의존 전압 원 E (voltage-dependent voltage source)와 전압 의존 전류 원 G (voltage-dependent current source)를 사용하였다. 그림 4의 E1 - E4 및 G1으로 이루어진 소자들은 그림 1에서  $R_s$ 에 대응되며 표 1에서 얻은 임피던스를 나타낸다. E1은 인가된 전압에 따른 쉬스의 크기(식 (6) 및 식 (9))를 구하기 위한 소자이며, E2 - E4는 E1에서 구해진 쉬스의 크기 및 식 (5)와 식 (8)의 전류-전압 특성으로부터 전류의 크기를 계산하는 소자이다. 따라서 E4

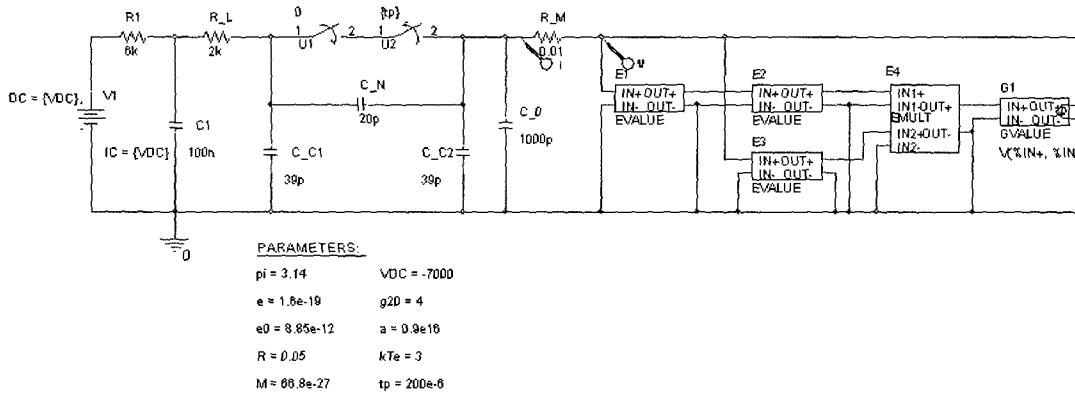


그림 4. 전체 펄스 시스템의 Pspice 회로 모델 (E1 - E4, G1은 동적 플라즈마 부하를 등가적으로 표현한 것임)

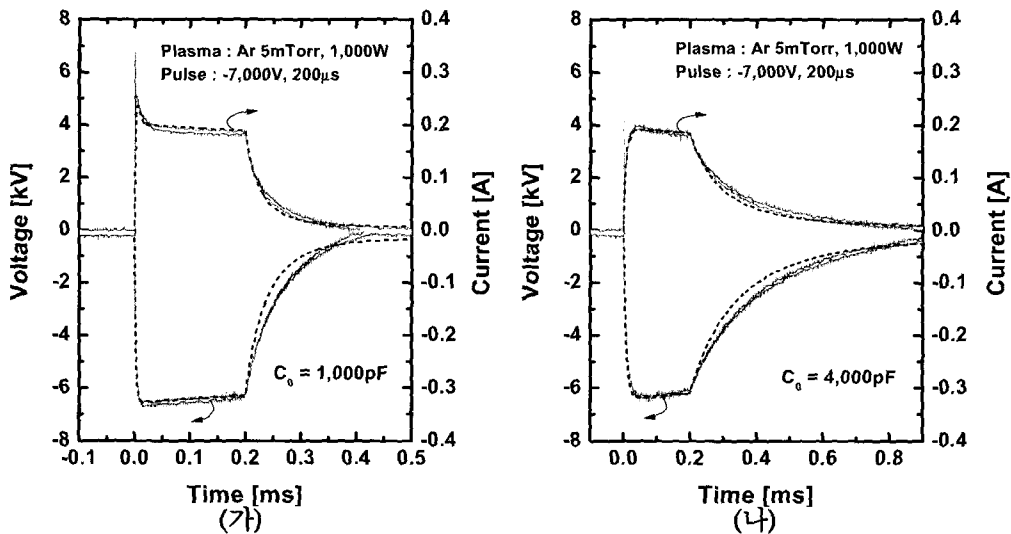


그림 5. 주 축전기 전압 -7 kV, 펄스 폭 200  $\mu$ s의 펄스를 압력 5 mTorr, RF 1.0 kW의 아르곤 플라즈마에 삽입된 SUS 평판 전극에 인가하였을 경우의 펄스 파형 ((가)  $C_0 = 1,000$  pF, (나)  $C_0 = 4,000$  pF, 실선은 실험에서 측정된 파형이며 점선은 회로 모델로 구한 값)

의 출력은 부하에 인가된 전압으로부터 플라즈마 스위치를 통하여 흐르는 전류 값을 계산하여 전압 값으로 표현한다. 소자 G1은 이 값을 전류로 환산하여 회로로 다시 되돌아 흐르는 전류로 전환시키는 역할을 한다. 이 과정을 통하여 부하 임피던스의 비선형적인 특성을 고려하여 펄스 전압 변화와 부하 전류를 일관적으로(self-consistent) 계산할 수 있도록 하였다. 소자 E1 - E4 및 G에 적용된 수식은 부록 A.2에 나타내었다.

### III. 회로 모델과 실측 결과 비교

그림 2의 플라즈마 반응기에 5 mTorr (0.66 Pa)의 아르곤 가스를 주입한 후 1.0 kW와 1.5 kW의

13.56 MHz의 고주파 전력을 인가하여 플라즈마를 발생시켰다. 그림 2의 LP2를 이용하여 플라즈마 밀도 분포를 측정된 결과 식 (4)의  $a$ 값은 1.0 kW와 1.5 kW의 경우에 각각  $0.9 \times 10^{16}$ 과  $2.4 \times 10^{16}$ 이었으며, 전자온도( $kT_e$ )는 두 경우 모두 약 3.0 eV로 측정되었다[9]. 펄스 전원과 연결된 표적에 스위치의 개폐 동작을 통하여 일정시간 동안 음의 고전압을 인가하여 표적 전압과 전류 파형을 측정하였다. 이때, 전압과 전류 파형의 측정을 위하여 각각 고전압 탐침(Tektronix사, 모델: P6015A)과 전류 측정용 센서(Power Designs사, 모델: CVT-1A)를 이용하였다.

그림 5에서 압력 5 mTorr와 여기전력 1.0 kW의 아르곤 플라즈마에서 평판 전극에 전압 크기 -7

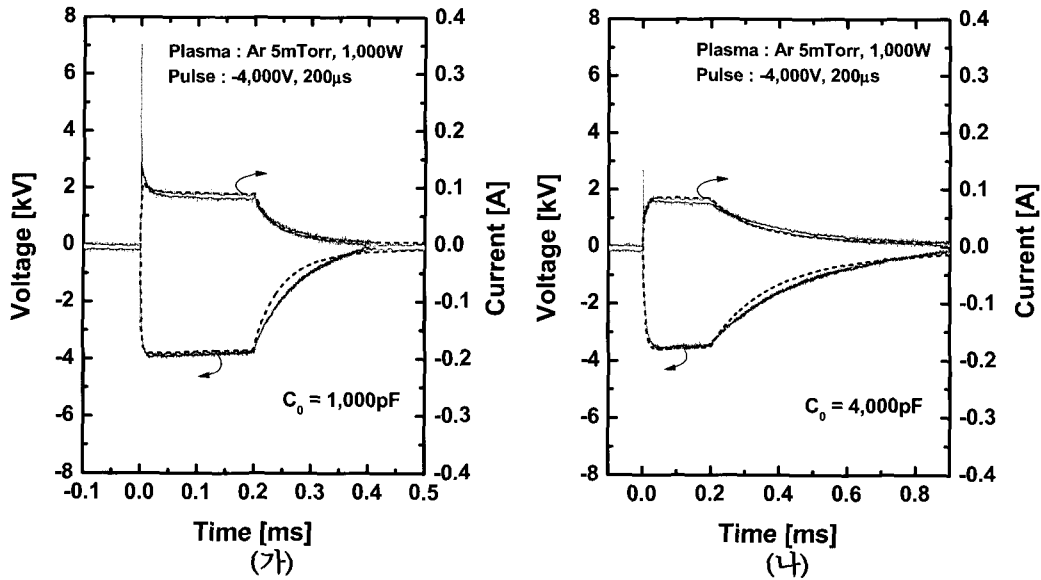


그림 6. 주 축전기 전압 -4 kV, 펄스 폭 200  $\mu$ s의 펄스를 압력 5 mTorr, RF 1.0 kW의 아르곤 플라즈마에 삽입된 SUS 평판 전극에 인가하였을 경우의 펄스 파형 ((가)  $C_0 = 1,000$  pF, (나)  $C_0 = 4,000$  pF, 실선은 실험에서 측정된 파형이며 점선은 회로 모델로 구한 값)

kV의 펄스를 인가한 조건에서 측정된 펄스 파형과 회로 모델로부터 계산된 전압, 전류 파형을 비교하였다. 그림 5의 (가)는 파형조절용 전기용량  $C_0$ 의 값이 1,000 pF인 경우이며, (나)는 4,000 pF인 경우이다. 펄스 오름시간 및 유지시간 동안(200  $\mu$ s)에는 모델 결과(점선)가 실험 결과(실선) 파형과 비교적 잘 일치하고 있고 펄스 내림시간에는 약간의 차이를 보이고 있다. 파형조절용 전기용량  $C_0$ 의 값을 변화시키면 그 값이 증가할수록 펄스 인가시 펄스 전원이  $C_0$ 를 충전하는 시간과 펄스 차단시  $C_0$ 가 부하로 방전되는 시간이 더 길어지기 때문에 전압 펄스 오름시간 및 내림시간이 그만큼 완만하게 되고 스위스 전기용량(그림 1의  $C_s$ )의 영향은 매우 작아진다. 회로 모델에서는 스위스의 전기용량 성분에 의한 변위 전류(displacement current)를 무시하였는데, 본 실험 조건에서의 스위스의 전기용량 성분은 약 100 pF 정도로써(그림 9의 설명 참조) 회로의 전기용량  $C_0$ 의 값보다 매우 작기 때문에 유효하다. 하지만 만약 회로의 전기용량  $C_0$ 의 값이 스위스 전기용량  $C_s$ 와 비슷하거나 작은 경우에는 스위스의 전기용량 성분에 의한 변위 전류를 포함하여야 회로에 흐르는 전류를 정확히 기술할 수 있다.

펄스 전압의 크기와 플라즈마 밀도는 표적 앞에서 형성되는 동적 플라즈마의 특성 변화와 표적 전류에 큰 영향을 미치게 된다. 그림 6은 그림 5와

동일한 플라즈마의 조건에서 주 축전기의 충전 전압을 -4 kV로 내렸을 경우의 펄스 전압 변화에 따른 표적 전류와 전압 파형이다. 또한 그림 7은 그림 5와 같이 주 축전기의 충전 전압의 크기를 -7 kV로 하고 고주파 입력 전력을 1.5 kW로 증가시켜 플라즈마의 밀도 증가에 따른 표적 전류와 전압 파형을 비교한 것이다. 그림 6과 7에서와 같이 회로 모델에서 계산된 펄스 형상(점선)이 실험에서 얻어진 파형(실선)을 비교적 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 하지만 그림 5의 결과와 마찬가지로 스위스의 전기용량 성분에 의한 변위 전류를 무시하였기 때문에 전압이 급격히 변하는 부분에서는 실험값과 약간의 차이를 보인다.

그림 6의 경우 펄스 내림시간 초기의 전압, 전류 파형의 기울기가 그림 5의 경우보다 완만하며 이는 같은 플라즈마의 상태라 하더라도 전압의 크기에 따라서 부하의 임피던스가 달라지기 때문이다. 즉, 그림 5의 경우(-7 kV 인가 시) 펄스 내림시간 초기의 임피던스는 그림 3의 A에 해당하는 약 33 k $\Omega$ 이었으나, 그림 6의 경우(-4 kV 인가 시)에는 약 40 k $\Omega$ (그림 3의 B)으로 증가하여 펄스의 내림시간이 완만해진 것이다. 그림 7의 경우, 플라즈마 발생용 고주파 입력 전력의 증가(1.5 kW)로 인하여 플라즈마의 밀도가 증가하여 부하의 임피던스가 감소하였으므로(그림 3의 점선 그래프) 그림 5의 경우(1.0

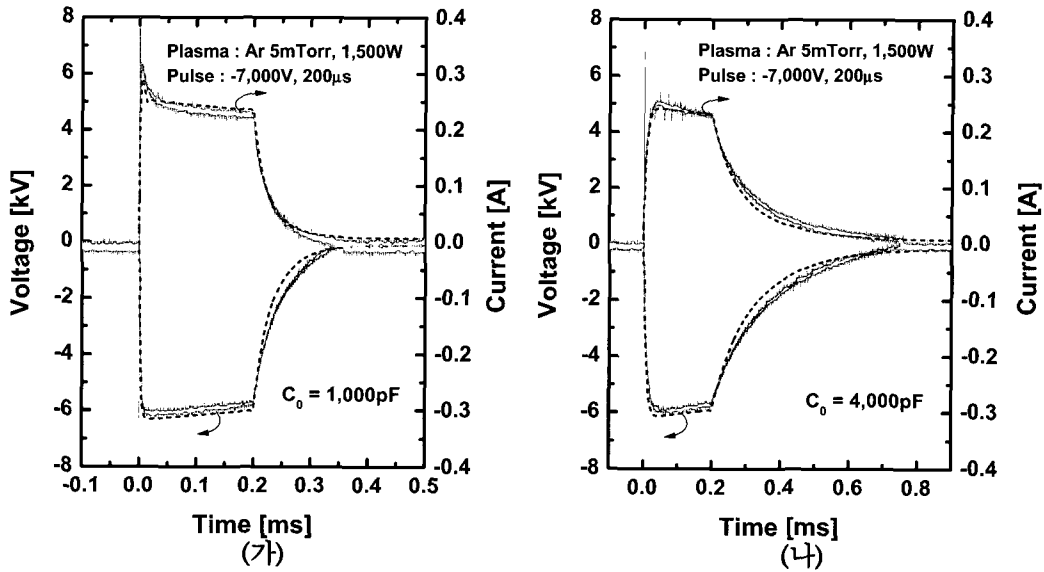


그림 7. 주 축전기 전압 -7 kV, 펄스 폭 200  $\mu$ s의 펄스를 압력 5 mTorr, RF 1.5 kW의 아르곤 플라즈마에 삽입된 SUS 평판 전극에 인가하였을 경우의 펄스 파형 ((가)  $C_0 = 1,000$  pF, (나)  $C_0 = 4,000$  pF, 실선은 실험에서 측정된 파형이며 점선은 회로 모델로 구한 값)

kW)와 비교하여 펄스의 내림시간이 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 플라즈마 쉬스의 전기용량 성분을 무시한다면, 펄스 전압의 내림시간은 부하의 임피던스와 전기용량  $C_0$ 의 곱에 의하여 결정되는 시정수(RC time)에 따른다. 펄스 내림시간 동안  $C_0$ 의 값은 일정한데 반해, 부하의 임피던스는 전압에 따라 변하기 때문에 펄스 내림시간 동안 시정수의 값은 일정하게 유지되지 못했다. 펄스 전압이 -3 kV인 경우의 부하 임피던스를 기준으로 하여 시정수를 계산하여 보면, 그림 5의 (가)의 경우에는 약 45  $\mu$ s ( $45 \text{ k}\Omega \times 1000 \text{ pF}$ ), (나)의 경우에는 180  $\mu$ s ( $45 \text{ k}\Omega \times 4000 \text{ pF}$ )가 되며, 그림 7의 (가)의 경우에는 약 30  $\mu$ s ( $30 \text{ k}\Omega \times 1000 \text{ pF}$ ), (나)의 경우에는 120  $\mu$ s ( $30 \text{ k}\Omega \times 4000 \text{ pF}$ )가 되어 실험에서 얻어진 펄스 전압의 내림 시간이 변화하는 이유가 부하의 임피던스에 따르고 있음을 보여준다.

그림 5 - 7의 전압 파형에서 주 축전기에 인가한 전압에 비하여 측정 및 계산된 표적 전압의 값이 작은 이유는 전류제한용 저항 (그림 4의  $R_L$ )에 전압의 일부가 분배될 뿐 아니라 펄스 인가 초기에 플라즈마 부하에 흐르는 전류가 커서 주 축전기 (그림 4의  $C1$ )의 전위가 초기 전압을 유지하지 못하기 때문이다. 또한 펄스 시스템의 성능 변수 (quality factor)로 펄스 전압 유지시간 동안에 펄

스 전압이 약간씩 감소(전압 평탄도의 감소: voltage droop의 발생)하는데, 인가전압이 높거나 플라즈마의 밀도가 높을수록 회로에 흐르는 전류가 증가하여 이 현상은 커지게 된다. 이는 주 축전기에서 플라즈마 부하로 방전되는 에너지의 양이 충전 전원에서 주 축전기에 공급하는 에너지보다 작기 때문에 발생하므로 주 축전기의 에너지(전기용량)를 높임으로 해소될 수 있을 것이다. 주 축전기의 전기 용량을  $C$ , 충전 전압을  $V$ , 부하에 흐르는 전류를  $I$ 라 하고 전류 제한용 저항의 손실을 무시했을 때, 축전기에 저장된 에너지의 방전률  $\beta$ 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\beta \approx \frac{\int_0^t V(t')I(t')dt'}{\frac{1}{2}CV^2} \quad (11)$$

여기서  $\beta$ 는 주 축전기의 에너지 방전률로서, 5%의 에너지 방전을 고려하면 0.05가 된다. 식 (11)에서 순수한 축전기의 용량만을 유추하기 위해 충전 전원에서 공급되는 에너지의 양은 무시하였다. 논의를 간단히 하기 위해 펄스 인가 시간동안 전압과 전류가 일정하다고 하면,  $\beta$  미만의 에너지 방전률을 유지하기 위해 필요한 주 축전기의 전기용량은



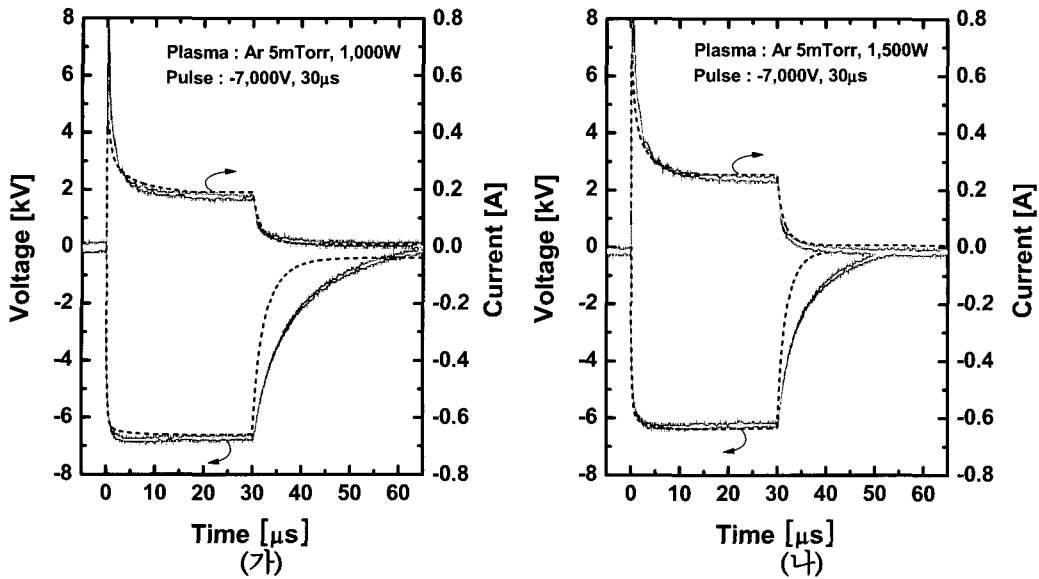


그림 8. 파형조절용 전기용량 C<sub>0</sub>를 제거한 후, 주 축전기 전압 -7 kV, 펄스 폭 30 μs의 펄스를 압력 5 mTorr의 아르곤 플라즈마에 삽입된 SUS 평판 전극에 인가하였을 경우의 펄스 파형 ((가) RF = 1.0 kW, (나) RF = 1.5 kW, 실선은 실험에서 측정된 파형이며 점선은 회로 모델로 구한 값)

다음과 같다.

$$C > \frac{2\Delta t}{\beta Z} \quad (12)$$

여기서 Z는 부하의 임피던스, Δt는 펄스 인가 시간(펄스 폭)을 의미한다. 그림 5의 경우를 예로 들면, 이때 부하의 임피던스는 33 kΩ(그림 3의 A)이므로 200 μs의 펄스 폭에 대하여 5% 이하로 에너지 방전률을 유지하기 위해서는 식 (12)로부터 약 0.24 μF 이상의 전기 용량이 필요함을 알 수 있다. 인가전압을 -4 kV로 낮추었을 경우인 그림 6에서는 부하의 임피던스가 40 kΩ(그림 3의 B)으로 증가하여 요구되는 전기용량은 0.20 μF으로 약간 낮아진다. 그림 7의 경우에는 플라즈마 밀도의 증가에 따라 부하의 임피던스가 26 kΩ(그림 3의 C)으로 낮아졌으므로 이때 필요한 전기용량은 그림 5의 경우보다 약간 증가한 0.31 μF 이상이 요구된다. 이와 같이, 플라즈마 부하의 특성은 이를 구동하는 펄스 전원에 영향을 미치기 때문에 안정적인 펄스 전원의 운전을 위해서는 이러한 특성을 고려하여 펄스 전원을 설계하여야 한다.

그림 8은 파형조절용 전기용량 C<sub>0</sub>를 제거하고 펄스 유지시간을 30 μs로 감소하여 펄스를 인가하였

을 때의 파형이다. 이 경우에는 회로 모델에서 계산된 전압, 전류의 값이 실험값과 큰 차이를 보이고 있다. 이 경우 시스템에 추가적인 전기용량 성분이 없기 때문에 펄스의 내림시간은 펄스 전원 자체의 고유 임피던스 성분(특히 그림 4의 C<sub>1</sub>C<sub>2</sub>)과 부하(플라즈마 스위스)의 임피던스에 의하여 결정된다. 그런데, 그림 8에서 회로 모델로부터 계산된 값은 펄스 전원 자체의 고유 임피던스 성분은 고려하였지만 부하의 임피던스에서 전기용량 성분은 고려하지 않았다. 따라서 플라즈마 스위스의 전기용량 성분에 의한 변위 전류를 무시하였기 때문에 비교적 전압이 빠르게 변하는 경우에 대하여는 펄스 시스템의 거동을 정확하게 묘사하지 못하게 된다.

그림 9는 플라즈마 스위스의 전기용량 성분을 100 pF으로 가정하여 회로 모델의 부하 임피던스에 포함시켰을 경우(그림 1의 C<sub>s</sub>를 100 pF으로 하였을 경우) 회로 해석으로 구해진 펄스 파형을 그림 8의 (가)의 실험값과 비교하여 그린 것이다. 플라즈마 스위스의 전기용량 성분을 무시하였을 경우(그림 8의 (가)의 점선 파형)에 비하여 전체적으로 실험값과 매우 유사한 파형을 보인다. 또한 플라즈마 스위스의 전기용량 성분을 그림 5 - 7의 경우에 적용시킬 경우, 펄스 전압의 상승이 급격한 초기 전압인가 시간 동안에 플라즈마 스위스 전기용량 성분에 의한 변

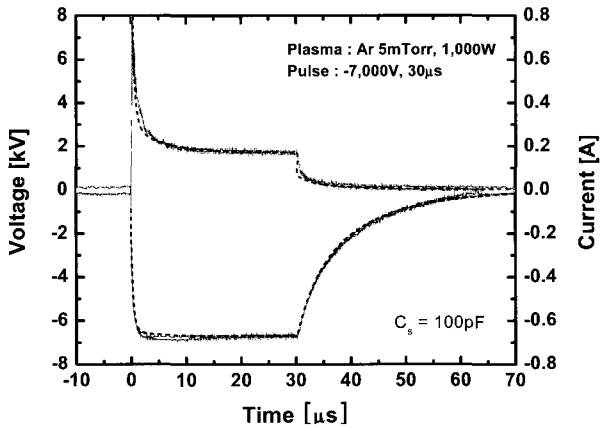


그림 9. 그림 8의 (가)와 같은 경우에 대하여 100 pF의 쉬스 전기용량 성분(Cs)을 포함하여 회로 해석을 한 경우에 계산된 펄스 파형과 실험과의 비교 (실선은 실험에서 측정된 파형이며 점선은 회로 모델로 구현 값)

위 전류의 추가로 인하여 실험값과 더욱 비슷한 방전 파형을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이 실험 조건의 영역에서 플라즈마 쉬스의 전기용량 성분은 약 100 pF 정도의 값을 갖는 것으로 생각할 수 있다. 일반적으로 이온의 움직임을 고려한 플라즈마 쉬스의 전기용량은 쉬스의 크기 및 전극의 면적 뿐 아니라 인가전압의 변화에 따른 이온의 이동 시간(ion transit time)과 운전 주파수까지도 고려해야하기 때문에 매우 복잡하게 표현된다 [15,16]. 또한 플라즈마 쉬스의 저항과 마찬가지로 인가전압에 따라 변하는 비선형적인 특성을 보이는 것으로 알려져 있다[17]. Rosa[15]와 Oliver[17]의 연구에 따르면 낮은 주파수 영역에서의 이온 이동 시간을 고려한 경우에 있어서 면적 A의 평판 전극 앞에 형성된 플라즈마 쉬스의 등가 전기용량은 다음과 같이 주어진다.

$$C_s = 0.76A(\epsilon_0 ne)^{1/2} \left( \frac{kT_e}{e} V \right)^{-1/4} \quad (13)$$

식 (13)을 이용하여 그림 8의 (가)의 경우에 대하여 쉬스 축전 성분을 구하면 약 30 pF이 된다 (-7 kV 인가시 쉬스 크기는 8.6 cm, 밀도 n은  $2.65 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ , 전자 온도는 3 eV를 이용함). 하지만 이 값은 쉬스의 가장자리 효과를 고려하지 않은 것으로 부록의 그림 A1과 같은 쉬스 형상을 고려한다면 면적의 증가로 인하여 전기용량은 더욱 큰 값

을 가질 것임을 예상할 수 있다. 이와 같이 이온의 플라즈마 쉬스 공간 이동 시간과 가장자리 효과를 고려하면 쉬스의 등가 전기용량 성분은 매우 큰 값이 되므로 전압의 변화가 빠른 경우에는 이 성분에 의한 변위 전류를 회로 모델에 반드시 포함시켜야 하며, 이에 대한 심도 있는 연구가 요구된다.

#### IV. 결 론

플라즈마 부하를 갖는 펄스 시스템은 전압의 준형 임피던스 특성을 보이며 부하의 비선형적인 특성과 가변성 전압 펄스의 상호 연관성을 고려한 자기모순이 없는(self-consistent) 회로 모델을 개발하여 펄스 시스템의 특성을 관찰할 수 있었다. 동적 플라즈마 부하로서는 RF 플라즈마 내에 삽입된 평판 전극에 음의 고전압 펄스를 인가하였을 때 발생하는 물리적인 현상을 고려하였으며, 전압 펄스의 오름과 유지, 내림시간 동안 형성되는 플라즈마 쉬스의 전류-전압 특성을 비선형 부하의 임피던스로 표현하였다. 여기서 개발된 플라즈마 부하 모델은 부하에 인가되는 전압의 크기와 그에 따른 플라즈마 쉬스 두께의 함수로 이루어지며, 전극 앞에서의 플라즈마의 밀도 분포와 유한한 크기의 전극의 사용으로 인한 가장자리 효과를 고려하였다. 부하를 포함한 전체 펄스 시스템에 대하여 Pspice 프로그램을 사용하여 회로 모델로 구현하였으며, 실험값과의 비교를 통하여 회로 모델의 적절성을 검증하였다.

실험과의 비교는 파형조절용 전기용량(C<sub>0</sub>)의 변화, 플라즈마 밀도 특성의 변화(RF 전력의 변화), 인가전압(V)의 변화 등 다양한 조건에서 이루어졌으며, 회로 모델이 실험 결과를 비교적 잘 모사하고 있음을 알 수 있었다. 하지만 펄스 전압이 빠르게 변하는 구간과 펄스 내림시간 구간에서는 회로 모델에서 플라즈마 쉬스의 전기용량 성분을 고려하지 않음으로써 실험값과 차이를 보였다. 이 경우 약 100 pF 정도의 전기용량 성분을 회로 모델의 부하 측에 추가함으로써 실험 결과를 보다 잘 설명하고 있음을 알 수 있었으며, 이 값은 이온의 이동 시간을 고려한 플라즈마 쉬스의 전기용량과 유사함을 확인할 수 있었다. 따라서 좀 더 정확한 회로모델을 완성하기 위해서는 구체적인 플라즈마 쉬스의 전기용량 성분의 분석과 펄스 내림시간 동안의 플라즈마의 거동을 모사할 수 있는 요소를 포함하여야 한다.

결론적으로 플라즈마 부하의 비선형 특성을 고려한 회로 해석과 실험으로부터, 전체 펄스 시스템을 구성하는 회로의 각 부분이 플라즈마 부하에 가해지는 펄스 전압과 전류의 파형에 미치는 영향을 체계적으로 분석하는 것이 가능해졌다. 이는 각 구성 요소 간의 상호 연관성에 의하여 큰 영향을 받는 펄스 시스템의 최적화에 있어서 매우 중요한 역할을 담당하며, 향후 높은 반복률(high repetition-rate)을 갖는 펄스 시스템의 개발에 있어서 설계 자료를 얻는 방법으로 활용될 수 있을 것으로 보인다.

## 부 록

### A.1 표적에 흐르는 전류 계산

무한 평면이 아닌 유한한 전극 앞에서 생성되는 쉬스의 경우에는 전극 끝 부분의 영향(가장자리 효과)을 무시할 수 없으며 그림 A1과 같은 쉬스의 형상을 갖는다. 그림 A1로부터 이온이 방출되는 면적은 다음과 같이 표현된다.

$$A(s) = \pi R^2 + \int_0^{\pi/2} 2\pi s(R + s \cos\theta) d\theta \quad (A1)$$

$$= \pi(2s^2 + \pi R s + R^2).$$

따라서 플라즈마로부터의 전류 밀도를  $J_i$ 라 하면 쉬스를 통하여 전극으로 흐르는 이온 전류  $I_i$ 는 다음과 같다.

$$I_i = J_i A(s) = (2\pi s^2 + \pi^2 R s + \pi R^2) J_i. \quad (A2)$$

쉬스 경계면을 통하여 흐르는 총 전류는 이온 전류와 전자 전류의 합으로 주어지는데, 고전압이 인가되면 이온은 매우 큰 에너지를 갖고 전극에 입사되기 때문에 이온 충돌에 의한 이차 전자 방출(secondary electron emission by ion impact)이 매우 중요한 전자 전류의 요소가 된다. 이온 충돌에 의한 이차 전자 방출 계수  $\gamma$ 는 입사되는 이온의 에너지와 다음과 같은 관계가 있음이 실험적으로 잘 알려져 있다[18].

$$\gamma(V) = \gamma_{20} \left( \frac{V}{20,000} \right)^{1/2} = \gamma_0 V^{1/2} \quad (A3)$$

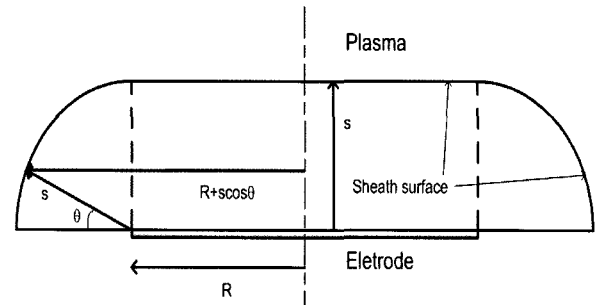


그림 A1. 유한한 크기의 원형 평판 전극 앞에 형성된 쉬스의 형상

여기서,  $\gamma_{20}$ 은 20 keV의 이온이 표적에 입사했을 경우의 이차 전자 방출 계수이며, 20 keV의 아르곤 이온(Ar<sup>+</sup>)이 스테인리스 스틸 전극에 입사하는 경우 약 4.0 근처의 값을 갖는 것으로 보고되고 있다[12]. 따라서 식 (A2)와 식 (A3)을 이용하면 쉬스를 통하여 흐르는 총 전류  $I(V)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I(V) = I_i + I_e = (1 + \gamma_0 V^{1/2})(2\pi s^2 + \pi^2 R s + \pi R^2) J_i. \quad (A4)$$

### A.2 비선형 부하에 사용된 수식

그림 3의 Pspice 회로 모델에서 E1-E4, G1에 적용된 수식은 다음과 같다.

- E1:  $1.13 * \text{pwr}(e0/(a * e), 2/7) * \text{pwr}(2 * e/M, 1/7) * \text{pwr}(\text{sdt}(\text{pwr}(\text{abs}(V(\text{IN})), 1.5)), 2/7)$  for  $s < s_c$   
 $0.89 * \text{pwr}(e0/(a * e), 2/5) * \text{pwr}(2e/(k * Te), 1/5) * \text{pwr}(\text{abs}(V(\text{IN})), 3/5)$  for  $s > s_c$
- E2:  $2 * \text{pi} * \text{pwr}(V(\text{E1}), 2) + \text{pwr}(\text{pi}, 2) * R * V(\text{E1}) + \text{pi} * \text{pwr}(R, 2) * (a * e * \text{pwr}(V(\text{E1}), 0.5) * \text{ddt}(V(\text{E1})))$  for  $s < s_c$   
 $2 * \text{pi} * \text{pwr}(V(\text{E1}), 2) + \text{pwr}(\text{pi}, 2) * R * V(\text{E1}) + \text{pi} * \text{pwr}(R, 2) * (0.6 * a * e * \text{pwr}(k * Te/M, 0.5) * \text{pwr}(V(\text{E1}), 0.5))$  for  $s > s_c$
- E3:  $-(1 + g20 * \text{pwr}(\text{abs}(V(\text{IN})), 20000, 0.5))$
- E4:  $V(\text{E2}) * V(\text{E3})$
- G1:  $I(V(\text{E4}))$

여기서, E는 전압 의존 전압 원(voltage-dependent voltage source), G는 전압 의존 전류 원(voltage-dependent current source)을 나타내

는 소자를 의미하며, 수식의  $pwr(x,y)$ 는  $x^y$ ,  $ddt(x)$ 는  $dx/dt$ ,  $sdt(x)$ 는  $x$ 의 시간에 대한 적분을 나타낸다. 또한  $g20$ 은 식 (A3)의  $\gamma_{20}$ ,  $pi$ 는  $\pi$ ,  $e0$ 는  $\epsilon_0$ ,  $a$ 는 식 (4)의  $a$ 를 의미한다.

### 감사의 글

이 연구는 산업자원부 산하 전력연구원의 전력산업연구개발사업 전력선행기술 (과제번호: R-2005-B-137)의 일환으로 수행되어 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] W. G. Chace and H. K. Moore, *Exploding Wires* (Plenum Press, Inc. 1959).
- [2] G. Schaefer, M. Kristiansen, and A. Guenther, *Gas Discharge Closing Switches* (Plenum Press, Inc. 1990).
- [3] M. A. Lieberman, *J. Appl. Phys.* **66**, 2926 (1989).
- [4] R. A. Stewart and M. A. Lieberman, *J. Appl. Phys.* **70**, 3481 (1991).
- [5] J. J. Barroso, J. O. Rossi, and M. Ueda, *IEEE Trans. Plasma Science* **31**, 104 (2003).
- [6] W. G. En, M. A. Lieberman, and N. W. Cheung, *IEEE Trans. Plasma Science* **23**, 415 (1995).
- [7] Pspice 10.5 demo software, Orcad (<http://www.orcad.com>) (2005).
- [8] <http://www.behlke.de>
- [9] 김근호 외, *전력산업연구개발사업 최종보고서* (과제번호 : R-2005-B-137) (산업자원부, 2006).
- [10] 황휘동, 정경재, 김근호, 고광철, 2005 추계 물리학회 (2005).
- [11] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, John Wiley & Sons, Inc. (2005).
- [12] B. Szapiro and J. J. Rocca, *J. Appl. Phys.* **65**, 3713 (1989).
- [13] J. T. Scheuer, M. Shamim, and J. R. Conrad, *J. Appl. Phys.* **67**, 1241 (1990).
- [14] B. P. Wood, *J. Appl. Phys.* **73**, 4770 (1993).
- [15] R. Rosa, *J. Phys. A: Gen. Phys.* **4**, 934 (1971).
- [16] A. Dengra, V. Colomer, and M. A. Hernandez, *Japanese J. Appl. Phys.* **24**, 1506 (1985).
- [17] B. M. Oliver, R. M. Clements, and P. R. Smy, *J. Appl. Phys.* **44**, 4511 (1973).
- [18] M. Shamim, J. T. Scheuer, R. P. Fetherston, and J. R. Conrad, *J. Appl. Phys.* **70**, 4746 (1991).

## Development of a Circuit Model for the Dynamic Plasma Load in a PSII Pulse System

K. J. Chung<sup>1\*</sup>, J. M. Choe<sup>1</sup>, H. D. Hwang<sup>2</sup>, G. H. Kim<sup>1</sup>, K. C. Ko<sup>2</sup>, Y. S. Hwang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Department of Nuclear Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742*

<sup>2</sup>*Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791*

(Received March 9, 2006)

A circuit model has been developed to analyze characteristics of the PSII(plasma source ion implantation) pulse system with dynamic plasma load. The plasma sheath in front of the immersed planar target biased with a negative-high voltage pulse is assumed to be governed by the dynamic Child-Langmuir sheath model. Target current is self-consistently varied with the applied voltage by using the voltage-controlled current source in the circuit model. Circuit simulations are conducted with Pspice circuit simulator, and simulated pulse currents and voltages on the target are compared and confirmed with experimental results for various voltage pulses and plasma conditions.

Keywords : Plasma sheath, Pulse system, Circuit model

\* [E-mail] pulseman@bcline.com