

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(8), 697-703(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.8.697

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

펄스형 플라즈마 추력기 성능해석을 위한
테플론의 이온화 비정상 모델링 연구

조민경*, 성홍계**

An unsteady modeling of the Teflon Ionization
for a Pulsed Plasma Thruster Performance

Mingyoung Cho* and Hong Gye Sung**

Korea Aerospace University* ,**

ABSTRACT

A teflon ionization modeling has been conducted to predict the performance of a PPT(Pulsed Plasma Thruster). One dimensional unsteady circuit model and Teflon ablation model were implemented. The Saha equation was adapted to predict the ionization of Carbon and Fluorine gas. The lumped circuit model including a resistance and a inductance model of a plasma was adapted to predict the magnitude of a discharge current. Numerical simulation results had good agreements with pervious research. The degree of current change according to PPT operating voltage was examined.

초 록

펄스형 플라즈마 추력기의 성능해석을 위해 Teflon의 승화와 이온화 모델링을 수행하였다. PPT 작동 시 발생하는 방전 전류의 변화를 예측하기 위해 일차원 lumped circuit model을 적용하였으며 Miceal Keidar가 제시한 테플론-플라즈마 온도에 따른 테플론 승화 모델을 적용하였다. Saha 방정식을 이용하여 테플론 구성 원소인 탄소와 불소분자의 이온화를 예측하였다. 프로그램 검증을 위해 선행실험 결과와 비교하여 유사함을 확인하였으며 PPT 작동 전압에 따른 전류 변화정도를 고찰하였다.

Key Words : Pulsed Plasma Thruster(펄스형 플라즈마 추력기), Lumped circuit model Teflon ablation(테플론 승화), Lorentz force(로렌츠힘)

Nomenclature

	ϕ_B : Magnetic flux (Vs)
	μ_0 : Magnetic permeability of free space(N/A^2)
α_i : ion current normalised by the arc current ratio	Γ_i : Ion erosion rate (kg/C)
β : correction factor	A_c : Cross area of Teflon (m^2)
	B : Magnetic field (T)

† Received : May 3, 2016 Revised : June 24, 2017 Accepted : July 3, 2017

** Corresponding author, E-mail : hgsung@kau.ac.kr

C_{PPT} : Capacitance of the PPT (F)
 E_0 : Ionization energy (eV)
 h : Separation distance between electrodes(m)
 \hbar : Planck's constant (J·s)
 I : Current (A)
 J : Current Density (A/m^2)
 k : Boltzmann constant (J/K)
 $L_{capacitor}$: Inductance of the capacitor (H)
 $L_{circuit}$: Inductance of the circuit (H)
 L_{plasma} : Inductance of the plasma (H)
 m : Mass (kg)
 \dot{m} : Mass flow rate (kg/sec)
 n : Number density ($1/m^3$)
 P : Pressure (Pa)
 T : Temperature (K)
 v : Velocity (m/sec)
 V : Volume (m^3)
 V_0 : Voltage applied across the Capacitor (V)
 R : Plasma radius (m)
 $R_{capacitor}$: Resistance of the circuit (Ω)
 $R_{circuit}$: Resistance of the circuit (Ω)
 R_{plasma} : Resistance of the plasma (Ω)
 S : Plasma cross area (m^2)
 x : y-direction Distance (m)
 Z : Atom distribution function

I. 서론

펄스형 플라즈마 추력기(PPT: Pulsed plasma thruster)는 추진제를 고전압으로 승화시켜 이온화된 추진제 입자들을 전자기력으로 가속시켜 추력을 얻는 전기 추진 시스템이다. 주로 테플론을 추진제로 사용하고 진공상태에서 고전압 상태에서 발생하는 방전에 의해 추진제가 승화되므로 발생 추력이 낮아 소형위성이나 cubesat의 자세 제어용 추력기로 활용되고 있다[1]. 국내의 경우 과학위성 2호에 적용된바 있다[2]. Fig. 1은 PPT의 개략도이다.

PPT와 같은 전기추력기는 일반적인 화학반응을 적용하는 추력기와는 다르게 전하를 띤 입자들이 추력기 내외부에 형성된 전자기장에 의해 거동하기 때문에 PPT 성능해석을 위해서는 추력기의 전자기장 모델링 및 추진제 승화 모델링이 필요하다.

선행 연구 그룹의 경우 추력기 내부 추진제의 승화와 이온화 과정 및 이온화된 추진제 입자의

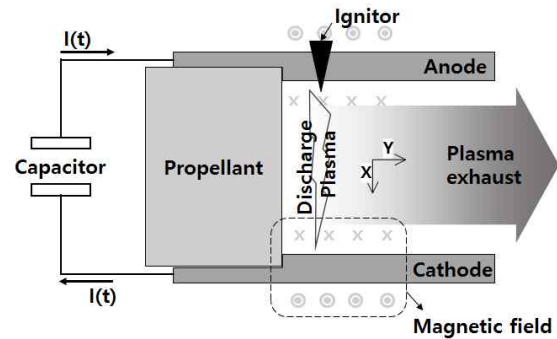


Fig. 1. Schematics of a PPT

거동 모사를 위해 수치 해석적 연구를 진행하고 있으며[3-5] 추력기의 동적거동 특성 연구를 위해 일차원으로 단순화한 모델이 연구 되었다[6, 7]. 추력기 동적 거동 해석을 위한 일차원 해석 모델의 경우 유동해석 모델에 비해 짧은 해석 시간으로 추력기 성능을 도출 할 수 있기 때문에 추력기 작동 조건 변화에 따른 해석이 용이하지만 특정 실험 데이터에 과도하게 의존하는 모델링의 경우에는 해석 모델의 정확성을 일정 조건 내에서만 확보할 수 있다는 단점이 있다.

본 연구에서는 추력기 성능해석 및 작동 특성을 이해하고 해석 프로그램의 범용성을 확보하기 위해 이론식에 기반을 둔 일차원 해석 모델을 정립하고 기존 실험 연구 결과[6]와 해석 결과를 비교하여 검증하였다.

II. 지배방정식

2.1 운동방정식

PPT의 유동을 단순화하여 계산하기 위해 일차원으로 근사한 뉴턴 제 2 법칙을 적용한다. PPT 추력기의 경우 다음과 같은 이유로 추력 산출의 모델링을 단순화 할 수 있다. 1) 추력기 작동 시 발생하는 추진제의 유량은 $5\sim 15 \mu g/sec$ 로 극히 작기 때문에[8] 추력기 내 유동장에 의한 압력 변화는 무시한다. 2) 추력기 내에서 전하를 띤 입자가 전자기장에 의한 가속으로 축방향(Fig. 1 y축 방향)으로의 운동량 변화가 크다. 이 때 추력 발생에 유효한 힘은 추력기 출구방향으로 가속되는 힘이므로 출구방향에 수직인 방향으로 형성되는 두 전극 사이의 전위차는 추력 발생에 크게 영향을 미치지 않다고 할 수 있다. 그러므로 추력기 출구 방향으로 작용하는 힘은 추력기 내에 형성된 자기장에 의한 Lorentz 힘으로 단순화가 가능하며 이는 식 (1)과 같다.

$$\frac{d}{dt}(m_{tot}v) = v \frac{dm_{tot}}{dt} + m_{tot} \frac{dv}{dt} = \int_V J \times B dV \quad (1)$$

여기서 v 는 유체의 속도이며 dm_{tot}/dt 은 방전 시 발생하는 질량 유량값으로 PPT의 경우 전극에서 방전이 발생할 때 전극으로부터 분리되어 나오는 구리이온과 테플론 표면에서 승화된 테플론 기체가 이에 속한다. 전극에서 분리되어 나오는 구리이온의 양은 발생하는 전류값에 비례하므로 질량 유량은 식 (2)와 같이 표현 가능하다.

$$\frac{dm_{tot}}{dt} = \Gamma_i I + \dot{m}_{teflon} \quad (2)$$

방전 시 발생하는 전류를 양극에서 음극에 수직인 방향으로만 흐른다고 가정하고 두 전극이 무한히 긴 도선이라고 할 때 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[6]. 여기서 h 는 전극 사이의 거리, ϕ 는 전극의 두께의 절반을 의미한다.

$$\int_V J \times B dV = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \log\left(\frac{2h}{\phi+h}\right) \quad (3)$$

식 1에 식 2와 3을 대입하여 정리하면 식 4와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (\Gamma_i I + \dot{m}_{teflon}) \frac{dx}{dt} + \frac{d^2x}{dt^2} \left(\Gamma_i \int_0^t I dt + \int_0^t \dot{m}_{teflon} dt \right) \\ = \mu_0 \frac{I_z}{2\pi} \log \frac{2h}{\phi+h} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 Lumped circuit 모델

방전 시 발생하는 전류값과 승화되는 테플론의 양에 대한 모델링이 필요하다. 본 연구에서 전류값 예측을 위해 Lumped circuit 모델(식 (5))을 적용하였다.

$$V_0 - \frac{1}{C_{PPT}} \int I dt = IR_{circuit} + L_{circuit} \frac{dI}{dt} + I \frac{dL_{circuit}}{dt} \quad (5)$$

여기서 V_0 는 인가전압을 의미하며, C_{PPT} 는 전극에 전원을 공급해주는 커패시터의 용량값을 의미한다. 회로의 전체 인덕턴스($L_{circuit}$)와 저항($R_{circuit}$)은 도선의 저항과 인덕턴스를 무시한다면 커패시터, 전극, 플라즈마 구간의 값들의 합으로 표현 가능하다. (식 (6), 식 (7))

$$L_{circuit} = L_{capacitor} + L_{electrode} + L_{plasma} \quad (6)$$

$$R_{circuit} = R_{capacitor} + R_{electrode} + R_{plasma} \quad (7)$$

플라즈마의 인덕턴스의 경우 자속과 전류에 대한 함수(식 (8))이며 폐구간에서 자기장은 보존되

므로 그 값은 0이다.

$$L_{plasma} = \frac{\phi_B}{I} = \frac{1}{I} \oint B dS = 0 \quad (8)$$

커패시터의 인덕턴스($L_{capacitor}$)와 저항값($R_{capacitor}$)은 시스템에 적용하는 커패시터의 모델에 따라 변화하는 값으로 실험을 통해 얻어낼 수 있다. 전극의 인덕턴스($L_{electrode}$)와 저항($R_{electrode}$)은 전극에서 발생하는 유도전류에 의해 변화하므로 이를 모델링하여 예측할 수 있다. [6] 전극 사이에서 발생하는 플라즈마의 저항값(R_{plasma})계산을 위해 정상상태 일차원으로 근사화한 MHD (Magnetohydrodynamics) 방정식[9]을 이용하였으며 방정식의 형태는 식 (9)~(14)와 같다.

$$\frac{d(\rho v_z S)}{dz} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{dS}{dz} = 2\pi R \frac{v_r}{v_z} \quad (10)$$

$$\frac{dR}{dz} = \frac{v_r}{v_z} \quad (11)$$

$$(\rho v_z S) \frac{dv_z}{dz} = - \frac{d(PS)}{dz} + \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \frac{d \ln R}{dz} \quad (12)$$

$$(\rho v_r S) \frac{dv_r}{dz} = \frac{3PS}{R} - \frac{\mu_0 I^2}{2\pi R} \quad (13)$$

$$\frac{dn_e}{dz} = \frac{I \alpha_i}{e S^2 v_z^2} \frac{dS}{dz} \frac{dv_z}{dz} \quad (14)$$

여기서 S 는 플라즈마의 단면적을 그리고 R 는 플라즈마의 반경으로 $S = \pi R^2$ 이다. P 는 플라즈마의 국부 압력을 나타내며 I 는 플라즈마에 의해 발생하는 전류, e 는 전자하나가 갖는 전하량을 의미한다.

2.3 Teflon ablation 모델

식 (4)를 이용하여 PPT 내부 유동을 계산에 필요 변수인 승화된 테플론의 양을 예측하기 위해 Mickeal Keidar가 제시한 테플론-플라즈마 온도에 따른 테플론 승화에 대한 해석적 모델[10]을 적용하였다.

PPT의 경우 초기 두 전극사이 방전에 의해 플라즈마가 형성되며 플라즈마에서 추진제 표면으로 열전달이 발생하게 된다. 이때 공급된 에너지로 추진제가 승화되거나 해리되어 플라즈마화 되고 전자기장에 의해 가속되어 추력이 발생된다.

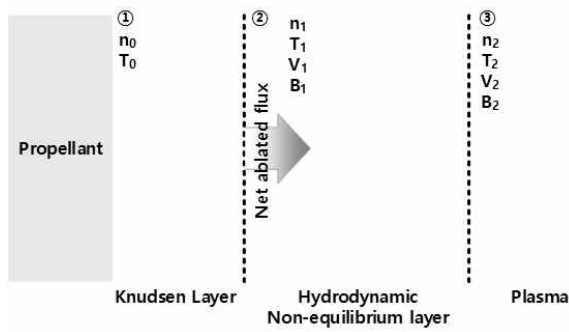


Fig. 2. Near surface layer schematic

이 때 추진제 승화 정도에 따라 플라즈마의 가속 및 추력기 시스템의 성능이 좌우되기 때문에 신뢰도 높은 추력기 성능 해석을 수행하기 위해서 정확한 ablation 모델이 필요하다. Fig. 2는 추진제 표면에서 일어나는 승화 및 플라즈마화 현상을 물리적 변화에 따라 크게 세 구간으로 나누어 나타낸 것이다.

경계 ③의 오른쪽 영역은 추진제표면에서 승화된 입자들이 완전히 해리되어 플라즈마화 되어 있는 영역이며 경계②와 ③사이 영역은 부분적으로 이온화 되었으나 아직 평형상태에 도달하지 못한 구간이다. 경계①과 ②사이 영역은 추진제가 플라즈마로 부터 에너지를 얻어서 추진제 표면에서 전자와 이온화된 추진제의 전자온도가 동일하지 않은 구간으로 추진제가 평형상태에 도달한 영역(경계② 이하)과는 다르게 전기전도도가 낮은 구간이다. 일반적으로 hydrodynamic non-equilibrium layer영역 경계 ②에서 수밀도는 $10^{23} \sim 10^{24} m^{-3}$ 이고 전자온도는 $2 \sim 4eV$ 이다 [11].

경계①과 ②에 대한 연속, 운동량, 에너지 방정식에 승화되는 입자에 대한 속도분포방정식을 대입하여 나타내면 다음과 같다[10](식 15~17).

$$\frac{n_0}{2(\pi d_0)^{0.5}} = n_1 v_1 + \beta \frac{n_1 (\exp(-\alpha^2) - \alpha \pi^{0.5} \text{erfc}(\alpha))}{2(\pi d_1)^{0.5}} \quad (15)$$

$$\frac{n_0}{4d_0} = \frac{n_1}{2d_1} \left((1+2\alpha^2) - \beta \left(\frac{(0.5+\alpha^2)\text{erfc}(\alpha) - \alpha \exp(-\alpha^2)}{\pi^{0.5}} \right) \right) \quad (16)$$

$$\frac{n_0}{(\pi d_0)^{1.5}} = \frac{n_1}{\pi d_1^{1.5}} \left(\alpha(\alpha^2+2.5) - \frac{\beta}{2} \left(\frac{\alpha(\alpha^2+2.5)\text{erfc}(\alpha) - (2+\alpha^2)\exp(-\alpha^2)}{\pi^{0.5}} \right) \right) \quad (17)$$

$$\text{여기서, } \alpha = \frac{v_1}{(2kT_1/m)^{0.5}}, d_0 = \frac{m}{2kT_0}, d_1 = \frac{m}{2kT_1}$$

식 (15)~(17)은 경계①과 ②의 온도(T_0, T_1)와 수밀도(n_0, n_1)간의 상관관계를 나타낸 식으로 플

라즈마의 상태 변화에 따른 추진제의 승화량 예측을 위해 경계②와 ③에 대한 연속, 운동량 방정식을 정리한 방정식(식 (18))을 적용하여 경계②에서의 속도값을 구한다.

$$\frac{v_1^2}{2kT_1/m} = \frac{(T_2 n_2 / 2T_1) - (n_1 / 2)}{n_1 - (n_1^2 / n_2)} \quad (18)$$

위 방정식에서 미지수는 플라즈마의 상태량을 알 때 n_0, n_1, T_0, T_1, v_1 이므로 해를 구하기 위해 추가적인 방정식이 필요하다. 추진제가 테플론일 경우 승화되는 추진제의 밀도는 표면의 온도에 대한 함수로 식 (19)와 같이 표현 가능하다 [8].

$$P_0 = n_0 k T_0 = P_c \exp(-T_c / T_0) \quad (19)$$

여기서 P_c 와 T_c 는 특성 압력과 온도 값으로 추진제마다 다른 값을 갖는다. 테플론의 경우 P_c 는 $1.84 \times 10^{15} N/m^2$, T_c 는 $20,815 K$ 이다.

식 (15)~(19)를 연립하여 미지수 n_0, n_1, T_0, T_1, v_1 의 해를 구하면 테플론의 승화는 테플론 표면 (A_c)에서 고르게 발생 한다고 고려하면 승화된 테플론의 질량유량(\dot{m}_{teflon})은 아래와 같다.

$$\dot{m}_{teflon} = m A_c v_1 n_1 \quad (20)$$

2.4 Teflon ionization 모델

플라즈마는 열적상태에 따라 고온플라즈마(HTP: High-temperature plasma)와 저온 플라즈마(LTP: Low-temperature plasma)로 나뉜다. 고온플라즈마는 $10^7 K$ 이상의 고온상태로 핵융합이 일어날 수 있는 상태의 플라즈마로 태양과 같은 항성의 핵 또는 성운, 핵융합 반응기 내에서의 플라즈마가 이 영역에 속한다. 저온 플라즈마는 이온과 전자의 열적상태에 따라 크게 두 개로 나뉜다. $2 \times 10^4 K$ 이하의 영역에서 이온과 전자의 온도가 유사한 영역을 thermal LTP로 정의하며 이온의 온도는 상온과 유사하고 전자의 온도가 $10^5 K$ 이하인 nonthermal LTP로 나뉜다[12]. thermal LTP의 경우 오로라나 상압 상태에서의 아크방전이 이에 속하며 nonthermal LTP는 저압 상태에서 글로우 방전이 이에 속한다. PPT의 경우 낮은 기압상태에서 아크방전에 의해 추진제 표면에서 승화와 추진제 가스의 이온화가 발생하기 때문에 국부적으로 이온과 전자의 온도가 유사한 thermal LTP로 가정 할 수 있다. 식 (21)은 Saha-Eggert 방정식으로 평형상태에서의 이온화

정도를 나타낸 식이다[4].

$$\frac{n_e n^{(r+1)}}{n^{(r)}} = 2 \exp\left(\frac{-E_0}{kT}\right) \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right)^{3/2} \left(\frac{Z^{(r+1)}}{Z^{(r)}}\right) \quad (21)$$

여기서 n_e 는 테플론 이온화에 의해 생성되는 전자의 수밀도를 의미하며 $n^{(r)}$ 은 r 가 이온의 수밀도를 의미한다. $Z^{(r)}$ r 가 이온 분자의 분포함수를 의미하고 E_0 는 이온화 에너지를 뜻한다. 그리고 h 는 플랑크 상수이다. 위 식을 이용하면 열적 상태에 따른 이온화 정도를 판가름 할 수 있기 때문에 승화한 테플론 기체가 추력기 방전 상태에서 어떠한 상태로 이온화 되는지 예측 할 수 있으며 테플론 이온화를 통해 추가적으로 얻어지는 전자의 수밀도를 예측 할 수 있다.

III. 해석 결과 검증

해석 결과 검증을 위해 선행 연구[3]에서 측정된 PPT 작동 시 전극사이에서의 전류변화 데이터와 비교하였다. 추진제로 테플론을 사용하였으며 테플론은 두 전극사이에 삽입되어 있는 형상으로 가정하였다. 검증에 적용한 인가전압과 전극의 형상 및 커패시터의 사양은 Table 1과 같다.

Figure 3는 실험결과와 해석결과를 비교한 그래프이다. 그래프는 인가전압이 596 V 경우에 대하여 실험 결과와 해석결과와의 전극사이의 전류변화를 나타낸다. 비교결과 해석과 실험결과 모두 인가 전압이 증가 할수록 최대 전류가 증가하며 이후 전류값이 사인파의 형태로 감쇠하는 유사한 결과를 보였다. 이러한 경향은 PPT가 추력을 얻기 위해 축전기에 충전된 전기에너지를 방전시켜 전류가 발생하고 이 때 발생한 전류가 시스템 전

Table 1. PPT specifications

High Voltage Capacitor	
Capacitance (μ F)	4.06
Charging Voltage (V)	596
Cap. Inductance (nH)	310
Cap. Resistance (m Ω)	33
Electrode	
Width (mm)	20
Thickness (mm)	10
Discharge Channel length (mm)	60
Separation (mm)	30

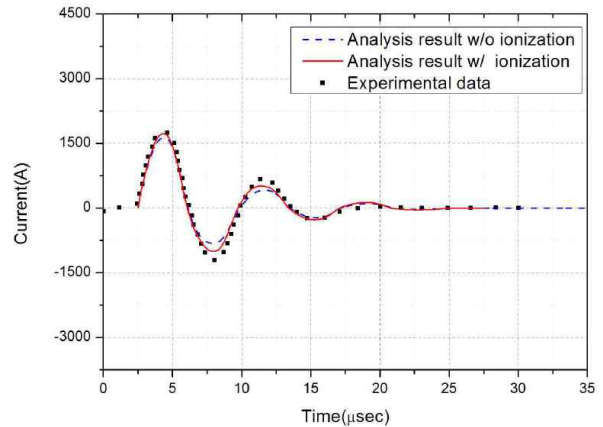


Fig. 3. Current comparison with experimental data ($V_0= 596$ V)

체 인덕턴스값과 저항값에 따라 감쇠정도가 변화되기 때문이다. 실험과 해석 결과 모두 최대 전류값은 인가전압이 596 V 일 때 약 1500 A를 나타내었으며 약 134 khz의 사인파 형태로 시간이 경과함에 따라 전류의 크기는 감쇠한다.

해석 시 승화되는 테플론의 이온화를 고려하지 않고 해석한 결과보다 테플론의 이온화를 고려하여 해석한 결과가 테플론 이온화에 따른 전자 생성이 고려되기 때문에 실제 실험 결과 전류 변화와 보다 유사하게 예측 되는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 테플론의 이온화가 플라즈마에 의해 발생하는 저항값에 영향을 주기 때문으로 판단되며 이를 고찰하기 위해 테플론 이온화를 고려하지 않은 경우와 이온화를 고려한 경우의 플라즈마 저항값의 변화를 비교하였다.

Lumped circuit 모델을 활용하여 방전 시 전류값을 예측하기 때문에 해석 모델에서 적용된 저항값에 따라 예측되는 전류의 감쇠 정도가 변화하게 된다. 플라즈마의 저항모델은 방전 시 플라즈마의 전도율에 반비례한다[6]. 플라즈마의 전도율은 전자의 수밀도에 대한 함수이고 테플론의 이온화를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 전자 수밀도 변화에 따라 전도율이 변화하게 되므로 플라즈마 유동의 저항 값이 변화하게 된다.

Figure 4와 5는 인가전압이 596 V 일 때 예측된 플라즈마 저항값을 나타낸다. 전류값이 0인 근방에서 저항값은 최대값을 보이지만 전류값이 0인 지점에서는 전자의 이동이 순간적으로 발생하지 않게 되므로 플라즈마 저항값 또한 0이 된다. 이후 구간에서 유사한 값을 갖는다. 또한 테플론 이온화를 고려하지 않은 경우보다 테플론 이온화를 고려하는 경우 플라즈마 역영에서 발생하는 전자의 수가 많아지므로 플라즈마 유동

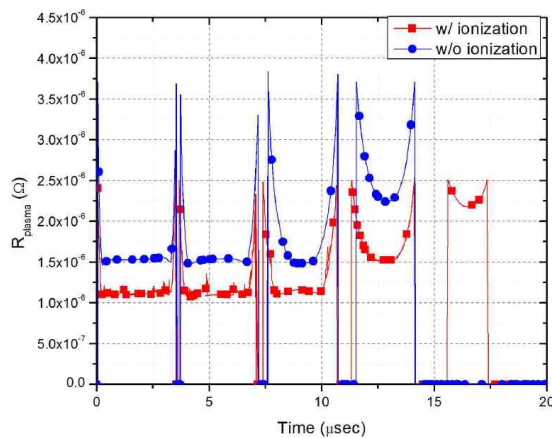


Fig. 4. Plasma resistance comparison ($V_0 = 596$ V)

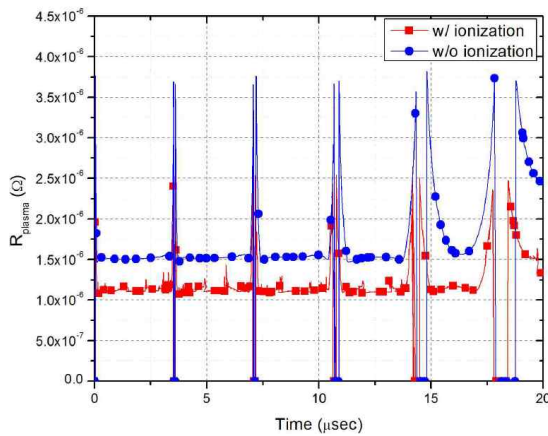


Fig. 5. Plasma resistance comparison ($V_0 = 1229$ V)

의 저항값이 낮아지게 된다. Fig. 4과 5에서 테플론의 이온화를 고려하지 않은 경우 플라즈마 유동에 의한 저항값은 약 1.5×10^{-6} Ω을 나타내며 테플론의 이온화를 고려한 경우에는 약 1.0×10^{-6} Ω을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이러한 플라즈마 유동에 의한 저항값의 차이로 인해 예측 전류 감소량이 변화하며 테플론 이온화를 고려한 경우 플라즈마 유동에 의한 저항값이 테플론 이온화를 고려하지 않은 경우에 비해 작은 값을 가지므로 방전전류가 비교적 적게 감소되어 실험 결과와 보다 유사한 결과를 나타내게 된다.

IV. 결 론

PPT의 추진제인 Teflon의 승화와 이온화를 고려한 일차원 비정상상태에서의 성능해석 기법을 제안하였다. Teflon의 승화량을 해석적으로 구하기 위해 Mical Keidar가 제시한 테플론-플라즈

마 온도에 따른 테플론 승화 모델을 적용하였으며 승화한 추진제의 이온화 예측을 위해 Saha 방정식을 적용하였다. 방전 시 발생하는 전류의 양을 예측하기 위해 Lumped circuit 모델을 적용하였으며 전극과 플라즈마에서의 저항과 인덕턴스 값을 모델링하여 적용하였다. 본 연구에서 사용된 예측 모델을 실험 결과와 비교하여 해석 결과를 검증하였다. 인가전압이 클수록 방전 시 발생하는 최대 전류의 양이 증가함을 확인하였으며 추진제의 이온화를 고려한 결과가 이온화를 고려하지 않은 결과보다 실험결과와 유사함을 확인 하였다. 실험 결과와 해석결과가 유사성을 갖는다는 것은 본 연구에서 사용된 모델링 기법이 실제 PPT 작동 시 발생하는 방전 전류의 변화율에 영향을 미치는 주요 인자들을 고려하고 있다고 볼 수 있다. 본 연구의 PPT 추력기 예측 모델을 활용하여 추력기 작동 시 발생하는 전류의 크기와 상변화를 예측하여 추력기 구동 제어 및 성능 예측에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 지원으로 수행되는 우주핵심 기술 개발 사업(NRF-2015M1A3A3A 02014484) 과제의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- 1) Pottinger S. J. and Scharlemann C. A., "Micro Pulsed Plasma Thruster Development" IEPC, 2007
- 2) Goo-Hwan Shin, Myeong-Ryong Nam, Jong-Tae Lim, "Analysis of Operation Characteristics for STSAT-2's Pulsed Plasma Thruster", KASA, 2005
- 3) Drew Ahern, "Investigation of the GEM MPD Thruster using the MACH2 Magnetohydrodynamics Code", Thesis for a master degree, 2013
- 4) He Bijiao, Zhang Jianhua, Cai Guobiao "Numerical Simulation of Stationary Plasma Thruster Plume", 56th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, 2005,
- 5) Toshiaki Edamitsu, Hirokazu Tahara "Experimental and numerical study of an electrothermal pulsed plasma thruster for small

satellites", *Vacuum* 80, 2006, pp.1223~1228

6) Peter V. S., "Pulsed Plasma Thrusters for Small Satellites", master thesis, University of Surrey, 2011

7) Nikolaos A. Gatsonis, Michael A. Demetriou "Prospects of Plasma Flow Modeling and Control for Micro Pulsed Plasma Thrusters", AIAA, 2004

8) Yiangos G. M., "Theoreticla Modeling and Optiomization of Ablation-Fed Pulsed Plasma Thrusters", Doctor thesis, Ohio State University, 1999, pp. 6~29

9) I. A. Krinberg, "Plasma Flow Crisis and

the Limiting Electron Temperature in a Vacuum Arc in Axial Magnetic Field", *Technical Physics Letters*, Vol. 31, No. 3, 2005, pp. 261~263.

10) Michael K. Iain D. B. and Isak I. B., "On the model of Teflon ablation in an ablation controlled discharge", *Journal of Physics D*, 2001

11) Michael K. and Isak I. B., "Plasma Engineering", Elsevier, 2013, pp.68~76

12) Hippler R., Kersten H., Schmidt M. and Schoenbanch, "Low Temperature Plasmas :Fundamentals, Technologies, and Techniques Volume 1", Willey-VCH, 2008, pp. 1~2