

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2015.19.6.001>

## 전열포 플라즈마 생성장치의 영차원 해석모델

김경진<sup>a</sup> · 박중윤<sup>a,\*</sup>

# Zero-Dimensional Modeling of Plasma Generator in Electrothermal Gun

Kyoungjin Kim<sup>a</sup> · Joong-Youn Park<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [jypark@kumoh.ac.kr](mailto:jypark@kumoh.ac.kr)

### ABSTRACT

This paper introduces a zero-dimensional modeling on the plasma generation in electrothermal gun operation. The plasma generator consists of alumina bore and aluminum electrodes which is electrically powered by outer pulse forming network and, traditionally, its numerical simulations have employed time-dependent one-dimensional governing equations. However, by assuming isothermal approximation along the bore and choked bore exit condition, present analysis simplifies the mass and energy equations into zero-dimensional approximation of plasma conditions coupled with mass ablation model and plasma property evaluation. The numerical results show good agreement with the corresponding one-dimensional computations and thus verify the present modeling approach.

### 초 록

본 연구에서는 전열포의 플라즈마 발생장치에서 외부회로로부터 가해지는 펄스형 전기에너지에 의한 플라즈마 발생현상을 대상으로 영차원적 모델링 및 전산해석을 수행하였다. 전극 사이의 보어 내 플라즈마의 균일 온도 가정을 채용하여 질량 및 에너지 방정식을 간소화하였으며, 보어 및 전극 표면 상의 용발 모델 및 플라즈마 물성치 계산모델과 연계하였다. 해석결과는 1차원적 해석모델과 비교하여 상당히 일치함을 보여 영차원적 해석결과의 유효성을 확인할 수 있다.

Key Words: Electrothermal Gun(전열포), Plasma Generator(플라즈마 생성장치), Zero-Dimensional Model(영차원 해석모델)

### 1. 서 론

화학추진제만으로 탄체를 가속하는 재래식 화포에 비하여, 전열화학포(electrothermal-chemical gun) 또는 전열포(electrothermal gun)는 화학에너지와 함께 외부에서 인가되는 전기에너지로 생성되는 플라즈마를 이용하여 탄체를 가속한다

Received 30 July 2015 / Revised 30 September 2015 / Accepted 6 October 2015  
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers  
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

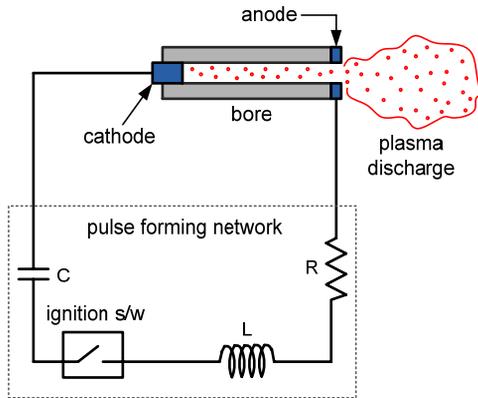


Fig. 1 Schematic diagram of plasma generator with pulse forming network in electrothermal gun.

[1]. 전열포는 펄스발생장치 내 축전기 뱅크에 저장된 전기에너지가 펄스 형태로 플라즈마 발생기로 공급되어 고온 고압의 플라즈마 제트를 생성하여 인근 장약을 연소시키게 된다.

전열포는 고밀도 장약의 사용 및 장약의 완전 연소가 가능하여 포구속도를 획기적으로 높일 수 있는 장점이 있으며, 미국 육군연구소[2-4], Texas 주립대[5,6] 등을 중심으로 하여 펄스형 플라즈마 생성 및 배출, 장약 점화 및 연소 등에 대하여 그동안 많은 실험적, 해석적 연구가 진행된바 있다. 국내에서도 국방과학연구소를 중심으로 전열포에 관한 전반적인 연구개발이 진행되었다[7].

전열포 보어 내 펄스형 플라즈마 발생에 관한 해석적 연구동향을 살펴보면, 보어 표면 용발현상이 표면 인근의 매우 얇은 영역에 일어남을 가정하여 1차원적 해석모델을 채용함이 일반적이다. Raja 등[8] 및 Weiss 등[9]은 준정상 1차원적 플라즈마 유동을 가정하여 각각 알루미늄 및 폴리에틸렌 보어 내 플라즈마 생성현상을 연구하였다. Zaghoul 등[10], Kim[11,12]의 해석연구에서는 비정상 1차원적 해석모델을 채용하였으며, 보어 내 플라즈마 유동이 준정상 가정에서 크게 벗어나지 않음을 확인하였다. Li 등[13]은 그동안의 선행연구에서 사용된 여러 보어벽 용발모델을 비교하였다. Li 등[14]은 준정상 2차원적 플라즈마 유동모델을 이용하여 플라즈마와

보어 표면 간의 질량 및 운동량 교환현상을 연구하였다. 한편 Powell과 Zielinski[4]는 보어 내 플라즈마 온도가 보어길이를 따라 균일함을 가정하여 전열포 영차원 해석을 수행한 바 있는데, 아직까지 이러한 간략화 모델이 고차원적 해석과 비교 검증된 바가 없다.

본 연구에서는 선행연구의 해석적 모델링 및 해석 결과를 기반으로 하여 플라즈마 발생장치 보어 내의 준정상 유동 및 균일 온도 가정을 이용한 영차원적 모델링 및 펄스형 플라즈마 유동 해석을 수행하였으며, 그 해석결과를 1차원적 해석결과와 비교하여 영차원적 모델의 유효성을 확인하고자 한다.

## 2. 플라즈마 생성장치 해석모델

### 2.1 영차원 해석모델

전열포의 플라즈마 발생장치는 Fig. 1과 같이 세라믹 또는 폴리에틸렌, 폴리카보네이트 재질의 보어와 양끝단의 금속 전극으로 구성된다. 외부의 RLC 회로형 펄스발생장치에서 전기에너지가 공급되면 양극 및 음극 전극사이에서 전기아크가 형성된다. 이에 높은 주열열에 의하여 보어와 양극 전극 표면의 질량 용발(mass ablation) 물질로 구성되는 플라즈마 유동이 원통형 보어 내부에 형성되어 보어 출구를 통하여 외부로 초음속 제트형태로 배출된다. 전열포의 플라즈마는 초고온, 초고압의 펄스제트 생성을 목적으로 하며, 전기아크의 주열열을 이용하여 통과하는 기체를 플라즈마화하여 배출하는 플라즈마 토치 등과 구분된다[15].

이러한 보어 내 플라즈마 유동의 질량 및 에너지 보존 지배방정식은 비점성 및 비정상 1차원적 유동을 가정하여 다음과 같이 표현된다[4,8,11].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u) = \dot{\rho}_a \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho u \left( \epsilon + \frac{p}{\rho} \right) \right) = \frac{J^2}{\sigma} \quad (2)$$

$$\epsilon = e + \frac{1}{2}u^2 \quad (3)$$

여기서,  $\rho$ ,  $u$ ,  $p$ ,  $e$ 는 각각 보어 내 플라즈마의 질량밀도, 속도, 압력, 내부에너지이며, 좌표  $z$ 는 양극 표면을 원점으로 하여 보어 길이 방향을 나타낸다. 보어 내 플라즈마는 국소적 열적평형이 유지되며, 자기압력은 미미하다고 가정하였다. Eq. 1의  $\dot{\rho}_a$ 는 보어 표면에서의 질량 용발률을 체적당으로 표현한 것이다. 그리고 Eq. 2의 오른쪽 항은 전극간 전기아크에 의한 주열열로서,  $J$  및  $\sigma$ 는 전류밀도 및 플라즈마 전기전도도를 나타낸다.

먼저 플라즈마 유동이 준정상임을 가정하고, 보어 내 플라즈마 밀도, 온도, 압력 등이 균일하다고 간소화한다면, 앞서의 질량 및 에너지 방정식을 보어 전체 길이영역( $0 \leq z \leq L$ )에 대하여 적분하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\rho u = \dot{\rho}_a L + \dot{m}_c \quad (4)$$

$$\dot{\rho}_a \left( \epsilon + \frac{p}{\rho} \right) = \frac{J^2}{\sigma} \quad (5)$$

Eq. 4에서 오른쪽 항의  $\dot{m}_c$ 는 양극 전극표면에서 발생하는 면적당 금속 용발률이며, 음극 전극은 모델 대상에서 제외하였다. 그동안의 관련 선행연구[4,13]와 같이 보어 표면의 질량 용발은 보어 내 플라즈마 벌크에 의한 표면 흑체 복사 열전달에 의한다고 가정한다면, 보어 표면의 질량 용발률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\rho}_a = \frac{4\sigma_{sb}T^4/D}{\epsilon + p/\rho} \quad (6)$$

위에서  $\sigma_{sb}$ 는 Stefan-Boltzmann 상수이며,  $D$ 는 보어 직경이다. 이런 결과를 앞서의 Eq. 5와 결합하면 플라즈마 벌크온도는 다음과 같이 간편히 표현된다.

$$T = \left( \frac{J^2/\sigma}{4\sigma_{sb}/D} \right)^{1/4} \quad (7)$$

양극 전극 표면에서의 질량 용발은 상당히 예측하기 어려운 물리적 현상이나, 준정상 1차원적 전열포 해석을 수행한 Raja 등[8]이 제시한 반실험적 모델을 채용하여 다음과 같이 전극 표면의 질량 용발률을 계산하였다.

$$\dot{m}_c = \frac{p_c - p}{\sqrt{2\pi R_h T_c}} \quad (8)$$

위 식에서  $p_c$  및  $T_c$ 는 전극 압력 및 온도이다. 전극 온도는 플라즈마 온도와 동일하고 전극 압력은 이 전극 온도에 대한 금속 전극의 증기압으로 가정하였다. 자세한 사항은 관련 연구[8]에 구체적으로 기술되어있다. 마지막으로, 전열포 플라즈마 발생장치 보어 내의 플라즈마 유동은 전기아크가 유지되는 동안 출구에서 초킹 조건이 성립되므로, 등엔트로피 팽창을 고려한 플라즈마 출구속도는 다음과 같다[11].

$$u = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \sqrt{\gamma_e (1 + \alpha) R_h T} \quad (9)$$

여기서,  $\gamma_e$ ,  $R_h$ ,  $\alpha$ 는 플라즈마의 유효비열비, 기체상수, 이온화도이다.

## 22 플라즈마 물성치 계산

앞서 언급된 전열포 플라즈마 유동 간소화 모델에서는 상태방정식, 내부에너지, 전기전도도, 이온화도 등 여러 플라즈마 물성치가 필요하며, 이를 위하여 먼저 플라즈마 화학조성 계산은 다음과 같은 일반적 형태의 Saha 이온화방정식이 이용되었으며, 이 때 보어 내 고온, 고압의 비이상 플라즈마 조건에 대한 이온화에너지 저감현상을 고려하였다[4].

$$\frac{n_{i+1}n_e}{n_i} = \frac{2}{\Lambda^3} \frac{q_{i+1}}{q_i} e^{-\frac{I_i - \Delta I_i}{kT}} \quad (10)$$

여기서  $n_e$ 는 전자밀도이며,  $n_i$ ,  $I_i$  및  $q_i$ 는 이온화된  $i$ 번째 원자종의 입자밀도, 이온화에너지

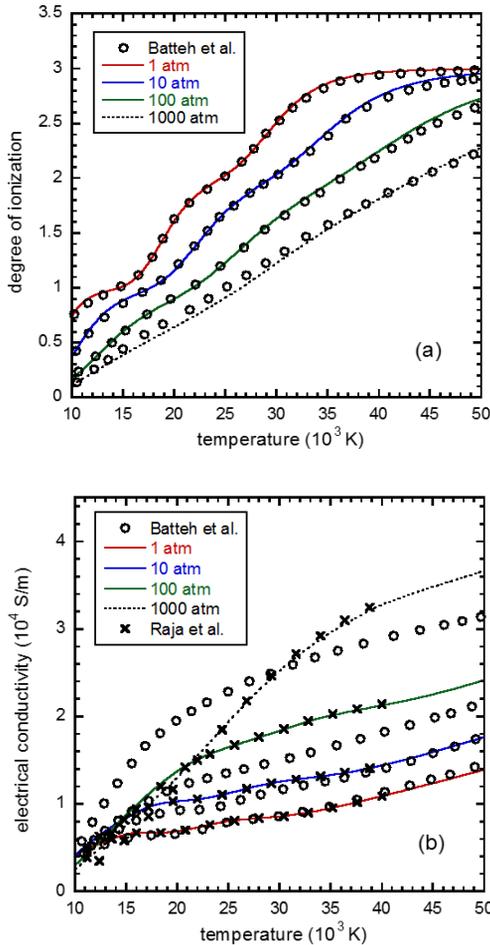


Fig. 2 Plasma properties for aluminum plasma as a function of pressure and temperature: degree of ionization (a) and electrical conductivity (b).

및 이온상태의 축퇴이다.  $\lambda$ 와  $k$ 는 DeBroglie 파장 및 Boltzmann 상수이다. 본 연구에서는 보이는 알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 전극은 알루미늄 재질을 대상으로 하였는데, 알루미늄 원자는 3차 이온화( $\text{Al}$ ,  $\text{Al}^+$ ,  $\text{Al}^{++}$ ,  $\text{Al}^{+++}$ ), 산소 원자는 2차 이온화( $\text{O}$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}^{++}$ )까지 고려되었다. 이상기체를 가정하여 플라즈마 상태방정식은 다음과 같다.

$$p = (1 + \alpha) \rho R_h T \quad (11)$$

위의 식에서 플라즈마의 기체상수 및 이온화도는 다음과 같이 정의된다.

$$R_h = k / \bar{m} \quad (12)$$

$$\alpha = n_e / n_h = n_e / \sum n_i \quad (13)$$

플라즈마의 전기전도도는 아래 수식과 같이 전자-이온화원자 및 전자-중성원자간의 충돌을 고려한 Liebermann과 Zollweg의 계산모델[16]을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma = \frac{n_e e_c^2}{m_e (\bar{\nu}_{en} + \bar{\nu}_{ei})} \quad (14)$$

플라즈마의 전기전도도 및 내부에너지 등 열역학적 물성치 및 수송계수 계산 등 구체적인 계산방법은 Powell과 Zielinski[4] 및 Batteh 등 [17,18]이 제시한 모델을 따랐다.

### 3. 해석결과 및 고찰

먼저 플라즈마 물성치 계산결과와 일부로서 3차 이온화까지 고려한 알루미늄 플라즈마에 대하여 이온화도 및 전기전도도가 온도와 압력의 함수로서 Fig. 2에 정리되어있다. Fig. 2(a)의 플라즈마 이온화도를 보면 Batteh 등[17,18]의 결과와 잘 일치하며, 알루미늄 입자의 이온화가 온도와 압력에 상당히 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 상압 정도의 낮은 압력에서는 40,000 K 이상의 높은 온도에서 이온화도가 3에서 정체되어 3차보다 더 높은 정도의 이온화 단계의 고려가 필요하다. 하지만 본 연구의 전열포 플라즈마 발생장치에서는 플라즈마 압력이 수 십 MPa에 이를 것으로 예상되어 3차 이온화도도 충분하다고 볼 수 있다. Fig. 2(b)의 전기전도도는 비이상 플라즈마 효과의 모델링 방법의 차이로 인하여 초고압에서 Batteh 등[17,18]의 결과와 어느 정도 불일치를 보이지만, Powell과 Zielinski[4]가 제시한 동일한 전기전도도 계산모델을 사용한 Raja 등 [8]의 해석결과와는 잘 일치하고 있다.

전열포의 플라즈마 발생장치는 Raja 등[8]이 대상으로 삼은 장치 구성 및 크기를 기본사양으로

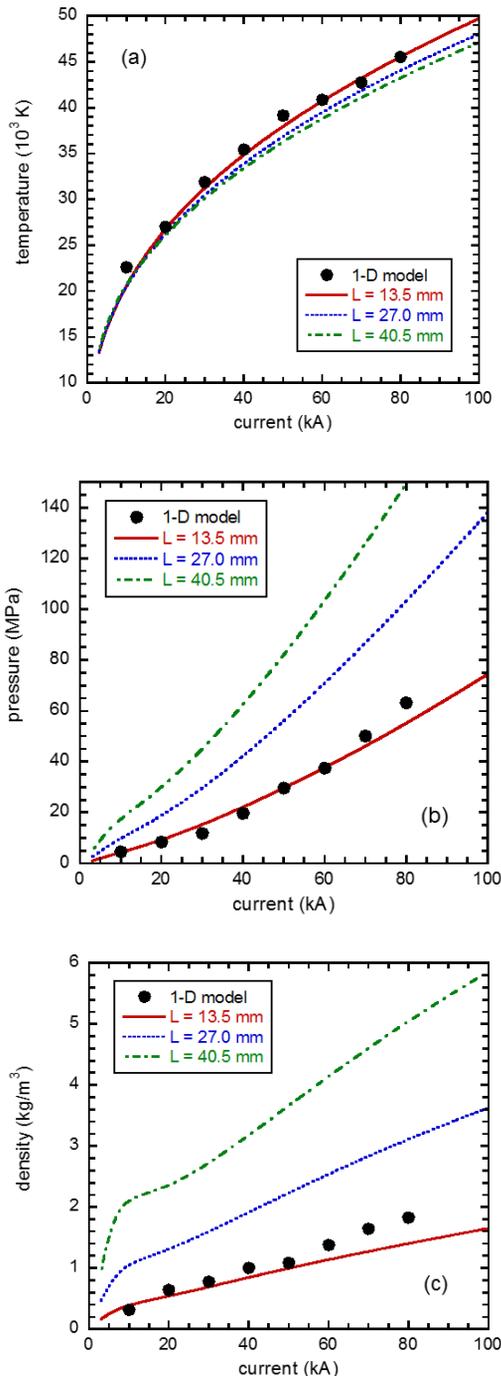


Fig. 3 Plasma temperature (a), pressure (b), and mass density (c) as a function of arc current from present modeling ( $D=6.65$  mm). Symbols are from 1-D model by Raja et al. [8] for the case of  $L=13.5$  mm.

하였으며, 이 때 양 전극간의 알루미늄 보어 길이는  $L=13.5$  mm이며, 보어 및 양극 전극의 직경은  $D=6.65$  mm이다. 준정상 균일온도 가정 영차원 모델에서는 주어진 장치 사양과 아크전류에 대하여 Eq. 6-9까지의 비선형 방정식을 플라즈마 물성치 모델의 상태방정식, 전기전도도 등 물성치 계산과 연립하여 전산해석을 수행하였다.

장치 기본사양에 대한 해석결과는 Fig. 3에 동일 직경의 보어가 2배 및 3배 긴 경우와 함께 정리되어 있다. 또한 Raja 등[8]의 준정상 1차원적 해석대상인 보어 길이  $L=13.5$  mm 경우는, 현 모델의 해석결과가 1차원적 해석의 보어 출구 온도, 압력, 질량밀도 결과와 비교되었는데, 먼저 Fig. 3(a)의 플라즈마 온도는 80 kA의 고전류까지 두 모델의 해석결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 1차원적 해석결과에서는 온도에 비하여 압력 및 질량밀도가 보어 길이방향으로의 구배가 좀 더 심하게 나타남을 고려할 때[11,12], Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)에 나타난 바와 같이 고전류에서 어느 정도의 불일치에도 불구하고 영차원적 모델이 상당히 유효함을 알 수 있다.

참고로 영차원적 모델은 전열포 보어 및 전극 형상구조가 Fig. 1과 같이 단순하고 출구 초킹조건 등이 성립할 때 그 유효성이 성립하리라 충분히 예상된다. 또한 이 연구에서 채용하는 간략화된 보어 및 전극 용발률 모델의 단순함을 전제로 한다. 따라서 좀 더 복잡한 형상구조 또는 키네틱 모델을 이용하여 좀 더 엄밀한 벽면 플라즈마 용발률 고려가 필수적인 경우에는 영차원 모델이 유효하지 않을 것이며 비정상 다차원적 모델이 필요할 수 있다.

보어 길이의 영향을 살펴보면, 플라즈마 온도의 경우에는 그 영향이 상당히 작음을 보여주며, 압력 및 질량밀도는 보어 길이에 따라 상당히 변함을 볼 수 있다. Fig. 4에서는 보어 길이가 상당히 짧은 경우(Fig. 4(a),  $L/D \approx 2$ )와 긴 경우(Fig. 4(b),  $L/D \approx 6$ )에 대하여 알루미늄 및 산소 이온화원자들의 물분율 변화를 아크전류 변화에 따라 살펴보았다. 예상대로 아크전류의 증가에 따라 출구에서의 플라즈마 이온화 정도가 높아진다. 또한 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)를 비교할 때, 보

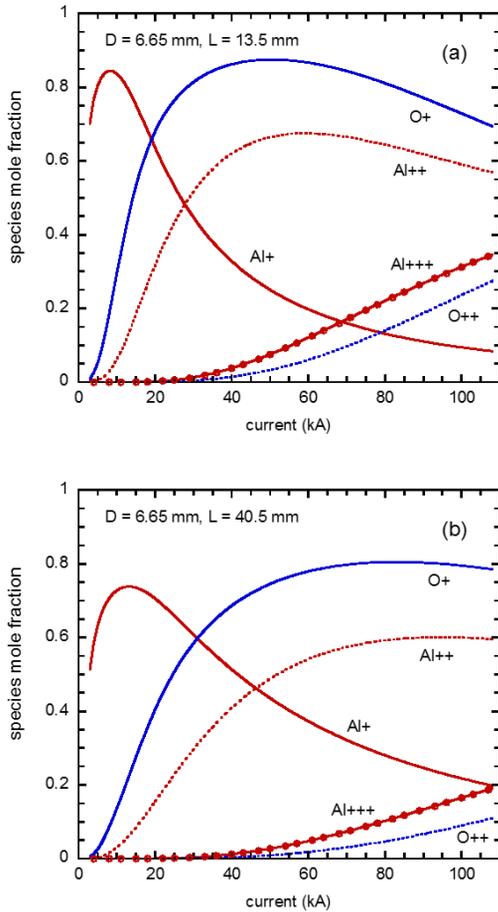


Fig. 4 Ionized heavy species composition for case of  $L=13.5$  mm (a) and  $L=40.5$  mm as a function of arc current from present modeling ( $D=6.65$  mm).

어 길이의 지나친 증가는 알루미늄 및 산소 원자 이온화 진행을 방해하여 플라즈마 발생기로서의 역할이 저해될 수 있다. 이러한 보어길이의 영향은 Fig. 5(a)의 플라즈마 이온화도에서도 관찰된다. 또한 아크전류가 100 kA인 경우에도 이온화도가 2 이하로 나타나 플라즈마 조성 계산에서 3차 이온화로 충분함을 확인할 수 있다. 한편 Fig. 5(b)의 플라즈마 출구속도 역시 1차원적 해석결과와 대체적으로 잘 일치하며, 보어 길이 증가에 따라 어느 정도 감소하고 있다.

마지막으로 보어 길이를 27 mm로 고정하고 직경을 9.41 mm와 13.3 mm로 증가시킬 때, 즉

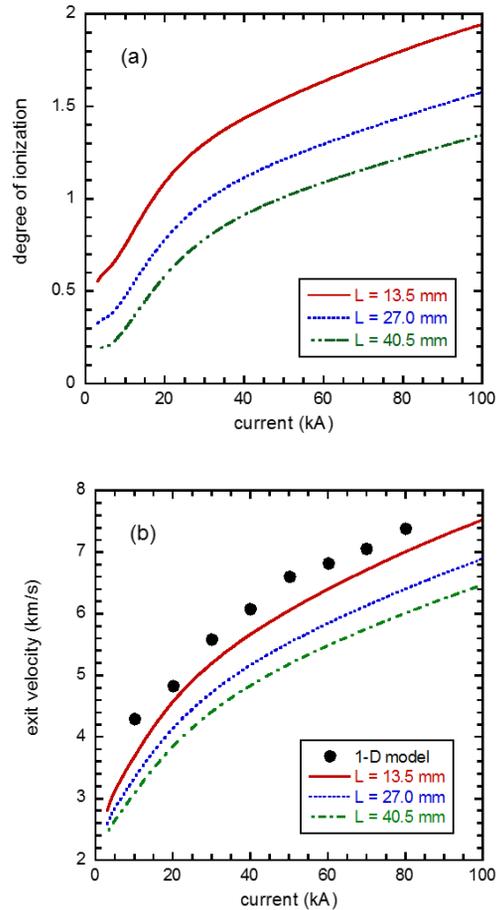


Fig. 5 Effects of arc current and bore length on the degree of ionization (a) and exit velocity (b) from present modeling ( $D=6.65$  mm). Symbols are from 1-D model by Raja et al. [8] for the case of  $L=13.5$  mm.

보어 단면적이 2배 및 4배로 증가하는 경우, 그 영향을 살펴보았다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 보어 직경 또는 단면적 증가에 따라 온도 및 압력이 대폭 감소함을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 7(a)에 나타난 플라즈마 이온화도는 거의 영향을 받지 않음으로 나타났는데, 이는 단면적 증가에 따른 보어 내 질량밀도 및 압력의 감소가 플라즈마 온도의 감소를 상쇄함으로 기인하는 것으로 보인다. 이러한 보어 직경 증가에 따른 내부 압력 감소는 플라즈마 출구속도에도 영향을 미쳐, Fig. 7(b)의 출구속도가 감소하고 있음을 볼

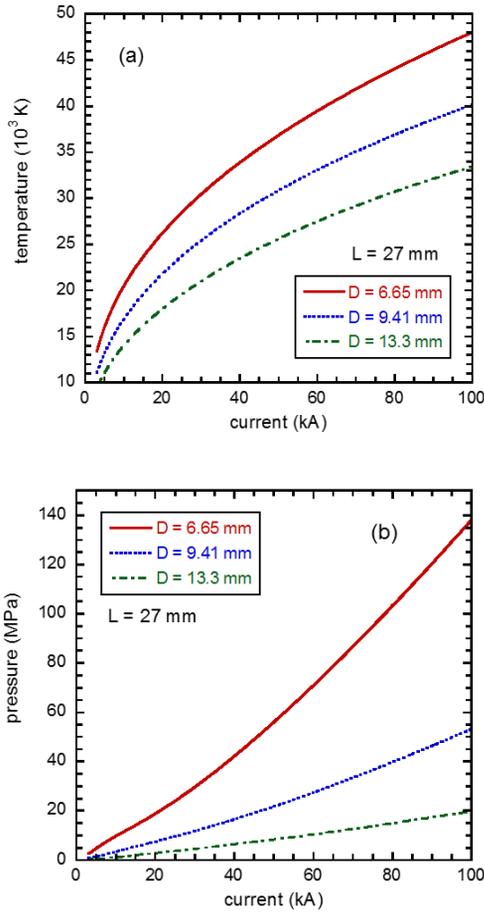


Fig. 6 Effects of arc current and bore diameter on plasma temperature (a) and pressure (b) from present modeling with identical bore length of  $L=27$  mm.

수 있다. 보어 길이 및 직경의 영향을 정리해보면, 예상대로 보어의 크기가 작아질수록 동일 아크전류에서 전열포의 플라즈마 제트의 강도를 대표할 이온화도 및 출구속도가 증가하리라 예상된다. 하지만 용발되는 보어 및 전극 질량 역시 감소하여 이를 고려한 적정한 보어 크기 선정이 요구된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전열화학포 또는 전열포의 플

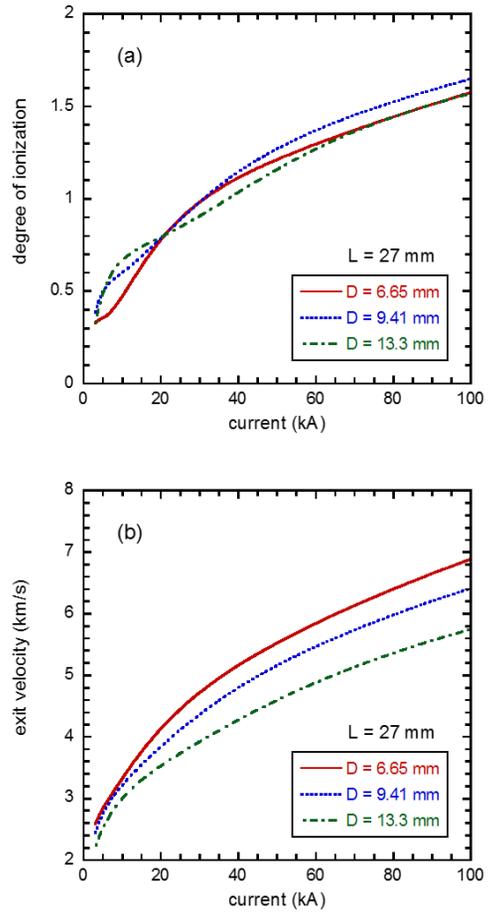


Fig. 7 Effects of arc current and bore diameter on degree of ionization (a) and exit velocity (b) from present modeling with identical bore length of  $L=27$  mm.

라즈마 제트 발생장치를 대상으로 하여 펄스형 아크전류에 따른 주울열 및 플라즈마 발생을 균일 플라즈마 온도 및 국소 열적평형을 가정하여 플라즈마 유동의 준정상 영차원적 모델링을 수행하였다. 수립된 플라즈마 유동모델은 보어 및 전극 표면 상의 용발 모델 및 플라즈마 물성치 계산모델과 연계하여 해석을 수행하였으며, 플라즈마 온도, 압력, 밀도, 출구속도 등 해석결과는 1차원적 해석모델의 보어 출구 결과와 잘 일치함을 보여 영차원적 해석모델의 유효성을 확인하였다.

또한 전열포 보어 길이 및 직경이 플라즈마

유동의 출구 온도, 압력, 이온화원자 조성, 이온화도 등에 미치는 영향을 분석하였다. 동일 전류량에 대하여 보어가 길어질 때 플라즈마 온도에 대한 영향은 미미하나, 출구 플라즈마 압력, 밀도, 이온화도가 대폭 낮아짐을 보였다. 이에 비하여 보어 직경이 커지면 예상대로 플라즈마 온도 및 압력이 대폭 감소하는데, 이온화도는 크게 변함이 없었다.

### 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문이다.

### References

1. Dyvik, J., Herbig, J., Appleton, R., O'Reilly, J. and Shin, J., "Recent Activities in Electrothermal Chemical Launcher Technologies at BAE Systems," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, Issue 1, pp. 303-307, 2007.
2. White, K.J., Katulka, G.L., Khong, T. and Nekula, K., "Plasma Characterization for Electrothermal-Chemical Gun Applications," ARL-TR-1491, 1997.
3. Nusca, M.J., White, K.J., Williams, A.W., Landsberg, A.M., Young, T.R. and Lind, C.A., "Computational and Experimental Investigations of Open-Air Plasma Discharges," *37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, USA, AIAA 99-0865, Jan. 1999.
4. Powell, J.D. and Zielinski, A.E., "Theory and Experiment for an Ablating-Capillary Discharge and Applications to Electrothermal-Chemical Guns," BRL-TR-3355, 1992.
5. Peterson, D.R., "Design and Operation of the Electrogun, an Electrothermal Gun for Producing Metal and Carbon Plasma Jets," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, Issue 1, pp. 373-378, 1997.
6. Kohel, J.M., Su, L.K., Clemens, N.T. and Varghese, P.L., "Emission Spectroscopic Measurements and Analysis of a Pulsed Plasma Jet," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, Issue 1, pp. 201-206, 1997.
7. Kim, S.H., Yang, K.S., Lee, Y.H., Kim, J.S. and Lee, B.H., "Electrothermal-Chemical Ignition Research on 120-mm Gun in Korea," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, Issue 1, pp. 341-346, 2009.
8. Raja, L.L., Varghese, P.L. and Wilson, D.E., "Modeling of the Electrogun Metal Vapor Plasma Discharge," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 11, Issue 3, pp. 353-360, 1997.
9. Weiss, E., Zoler, D., Wald, S. and Elias, E., "Modeling of Electrical Confined-Capillary-Discharge Where the Discharge Zone is Extended by an Additional Pipe," *Physics Letters A*, Vol. 373, Issue 10, pp. 972-975, 2009.
10. Zaghoul, M.F., Bourham, M.A. and Doster, J.M., "Semi-Analytical Modelling and Simulation of the Evolution and Flow of Ohmically-Heated Non-Ideal Plasmas in Electrothermal Guns," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 34, No. 5, pp.772-786, 2001.
11. Kim, K., "Time-Dependent One-Dimensional Modeling of Pulsed Plasma Discharge in a Capillary Plasma Device," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 31, Issue 4, pp. 729-735, 2003.
12. Kim, K., "Numerical Simulation of Capillary Plasma Flow Generated by High-Current Pulsed Power," *International Journal of Thermal Science*, Vol. 44, Issue 11,

- pp. 1039-1046, 2005.
13. Li, R., Li, X., Jia, S., Murphy, A.B. and Shi, Z., "Study of Different Models of the Wall Ablation Process in Capillary Discharge," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 38, Issue 4, pp. 1033-1041, 2010.
  14. Li, R., Li, X., Jia, S. and Murphy, A.B., "A Two-Dimensional Capillary Discharge Model Considering the Ablation and Deposition Processes," *Journal of Applied Physics*, Vol. 110, Issue 9, pp. 09902-1-6, 2011.
  15. Seo, J.H., Choi, S., Choi, S. and Hong, B.G., "Analytical Analysis of Segmented Arc Plasma Torch for Plasma Wind Tunnel Facility," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 15, No. 4, pp. 85-93, 2011.
  16. Liebermann, R.W. and Zollweg, R.J., "Electrical Conductivity of Nonideal Plasmas," *Journal of Applied Physics*, Vol. 62, Issue 9, pp. 3621-3627, 1987.
  17. Batteh, J., Powell, J., Sink, D. and Thornhill, L., "A Methodology for Computing Thermodynamic and Transport Properties of Plasma Mixtures in ETC Injectors," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, Issue 1, pp. 388-393, 1995.
  18. Rolader, G.E. and Batteh, J.H., "Thermodynamic and electrical properties of railgun plasma armatures," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 17, Issue 3, pp. 439-445, 1989.