

랑뮤어 탐침에 의해 변형된 열플라즈마 특성에 관한 해석적 연구

이종철^{a*} · 김윤제^b

^a강릉대학교 기계자동차공학부, 원주 220-711

^b성균관대학교 기계공학부, 수원 440-746

(2008년 3월 11일 받음)

플라즈마 진단법 중 손쉽게 구동이 용이한 장점으로 인해 범용 플라즈마 진단 장치로 사용되는 랑뮤어 (Langmuir) 탐침법은 탐침이 직접 플라즈마 내에 삽입됨으로써 플라즈마를 간섭하기 때문에 플라즈마 고유의 특성을 변형시키는 약점이 있다. 본 연구에서는 대기압 아르곤 자유 연소 아크 (free-burning arc)에 삽입된 랑뮤어 탐침에 의한 교란 영향을 고찰하기 위하여 탐침 유무에 따른 열플라즈마 상태를 수치계산 하였고, 온도장과 속도장이 왜곡된 정도를 비교 분석하였다. 열플라즈마를 모델링하기 위하여 열유동장과 전자기장에 관한 두 종류의 지배방정식을 상용 CFD 프로그램과 자체 제작한 서브루틴을 이용하여 연계 계산하였다. 삽입된 탐침에 의해 열플라즈마 온도장은 탐침의 앞뒤에서 모두 플라즈마 축의 수직 방향으로 큰 변화를 나타내는 열적 교란이 발생되었다. 속도장에서는 탐침 선단의 정체 영역과 후단 후류 영역에서 유동 교란이 발생되었으며, 삽입된 탐침의 영향이 국부적인 것이 아닌 플라즈마 유동장 대부분 영역에 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 따라서 탐침법의 신뢰성을 높이기 위해서는 탐침 삽입에 의한 플라즈마의 열유체역학적 교란을 고려해야 한다.

주제어 : 열플라즈마, 랑뮤어 탐침, 자유 연소 아크, 열유체역학적 교란, 전산유체역학

I. 서 론

다양한 산업에서 이용이 활발한 플라즈마는 전리하고 있지 않은 보통의 기체와 달리 하전입자의 존재, 높은 에너지, 고온 및 화학적 고활성이며 전자파 방출의 특징을 가지고 있다. 플라즈마는 여러 가지 특성으로 구분될 수 있지만 크게 저압 중에서의 글로우 방전 (glow discharge)에 의한 저온 플라즈마 (cold plasma)와 아크방전에 의해 생성된 열플라즈마 (thermal plasma)로 나눌 수 있다. 본 연구에서 전산유체역학 기법을 이용하여 수치계산한 열플라즈마는 제조 및 소재 분야에서 기계부품 및 장비 공작가공 (절단, 용접), 보호피막 및 고기능성 표면개질 (표면강화, 용사 코팅, 화학증착), 신소재 생산 (탄소나노튜브, 나노 분말) 등에 주로 사용되고 있다. 최근 환경 문제가 대두됨에 따라 고온고열의 소각용융로에 이용되어 유해 산업 폐기물을 열분해 시키거나 유리 고화시켜 공해문제를 해결하려는 기술개발에도 적용되고 있다. 장기적으로도 에너지, 신소재, 반도체 소자 제조, 환경 분야 등에서 플라즈마의 이용

이 점점 더 늘어날 전망이며, 이에 따라 다양한 플라즈마의 생성 및 제어, 측정 기술, 플라즈마의 물성을 측정하는 플라즈마 진단법 개발이 필요하다 [1,2].

현재 사용되고 있는 플라즈마 진단법에는 플라즈마로부터 방출되는 가시광을 측정하는 방출분광 분석법, 플라즈마 가스를 추출하면서 열 함유량을 측정하는 엔탈피 탐침법, 전압이 인가된 탐침에 유기되는 전류를 해석하여 플라즈마의 상태를 측정하는 랑뮤어 (Langmuir) 탐침법이 있다. 그중 손쉽게 구동이 용이한 장점으로 인해 범용 플라즈마 진단 장치로 사용되는 랑뮤어 탐침법은 탐침이 직접 플라즈마 내에 삽입됨으로써 플라즈마를 국부적으로 건드리는 실시간 교란식 방법으로써, 플라즈마의 밀도 및 온도를 측정하는 연구들이 꾸준히 수행되어 왔다. 교란되지 않은 플라즈마를 가정한 탐침에 관한 초기 이론은 Chung [3]에 의해 정립되었지만, 아직까지 탐침 V-I 특성과 교란되지 않은 플라즈마 상태를 연결할 수 있는 단순한 표현법은 없다. 탐침이 플라즈마에 삽입되면 그 근처에서 물리적인 조건들이 바뀌게 되는데 이는 탐침 자체에 의해서 교란된 플

* [전자우편] jcleo1@kangnung.ac.kr

라즈마를 측정한다는 것을 의미한다 [4]. 따라서 교란되지 않은 플라즈마 변수들을 측정할 수 있는지 확실치 않으며, 이를 확인할 수 있는 유용한 수치적 결과 및 탐침 존재로 인해 발생하는 플라즈마 열유체역학적 교란 (aerodynamic and thermal disturbances)에 관한 유용한 해석 결과가 없다. 본 연구에서는 대기압 플라즈마 유동장에 삽입된 실린더형 탐침의 영향을 고찰하기 위하여 탐침 유무에 따라 대기압 플라즈마의 상태를 수치계산하여 온도장과 속도장의 특징을 비교 분석하였다.

II. 수치해석

해석에 사용된 모델의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 해석결과의 일관성 및 검증은 위하여 선행연구 [5,6]에서 사용한 실험 장치의 크기 및 조건을 적용하였다. 아크는 음극과 양극 사이 5 mm 간격에서 발생되며, 텅스텐으로 이루어진 음극은 직경이 3.2 mm로 끝단은 60°의 완전한 원주각을 갖는다. Ar 가스는 환형 노즐을 통해 0.5 L/min의 일정한 유량으로 공급되며, 삽입되는 탐침의 직경은 0.25 mm이다. 본 연구는 국소열평형 (Local Thermodynamic Equilibrium, LTE) 상태의 아크 영역 속에 삽입된 탐침의 영향에 관련된 연구이기 때문에 플라즈마 특성에 미치는 질량유량의 중요성은 상대적으로 적다.

수치해석에 있어 난류모델은 플라즈마에 적용할 수 있도록 수정된 프란틀 혼합거리 모델 [7]을 사용하였고, 해석을 위한 경계조건은 표 1에 나타내었다 [8]. 국소열평형 하의

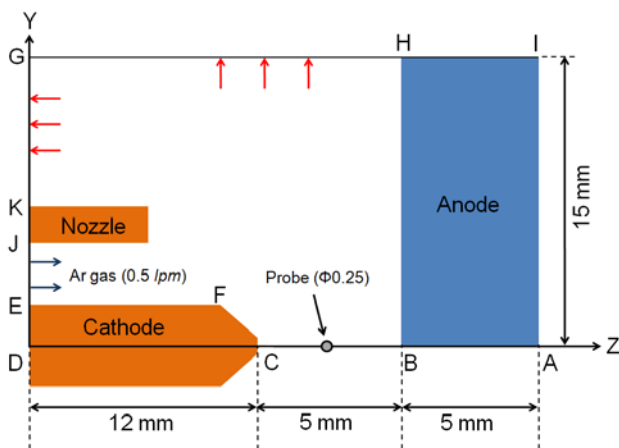


Fig 1. Schematic of a free-burning arc plasma system for computations.

축대칭 아크에 의한 열유동 방정식은 다음과 같은 보존형 Navier-Stokes 방정식으로 표현된다.

$$\nabla \cdot (\rho \phi \vec{V}) - \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) = S_\phi \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 종속변수, ρ 는 가스밀도, 그리고 \vec{V} 는 속도이다. 원통좌표계에서 생성항 S_ϕ 와 확산계수 Γ_ϕ 는 표 2에 표시하였다.

음극과 양극, 그리고 두 전극 사이에서 발생하는 아크에 관한 전자기 효과를 계산하기 위하여 식(2)와 같은 라플라스 방정식 형태의 정전위 포텐셜 (electrostatic potential, φ)을 추가적으로 계산함으로써 전류밀도 (J), 아크저항 (R), 전계분포 (E), 주울열 (σE^2) 등을 구하였다. 두 전극 사이에 발생된 아크를 통하여 전류가 흐르게 되고 이 전류 흐름에 의하여 원주방향의 자기장이 발생된다. 암페어의 주회법칙 (Ampere's circuital law)에 의해 원주방향 자기장 (azimuthal magnetic field) B_θ 은 식(3)과 같이 표현된다. 이들 전자기 해석을 통한 결과를 열유동 방정식과 연계 (coupling)할 수 있도록 식(1)의 운동량 및 에너지 방정식의 생성항으로 결합하여 아크 플라즈마를 위한 로렌츠힘과 주울열로 구성하였다. 보다 자세한 기호 설명은 참고문헌 [9]을 참고하기 바란다.

$$\nabla \cdot (\rho \nabla \varphi) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\theta) = \mu_0 j_z \quad (3)$$

Table 1 Boundary conditions for the temperature and the electric potential.

Boundary	T or h	φ
DE	1,000 K	$\partial\varphi/\partial z = j_a/\sigma$
EJ	1,123 K	$\partial\varphi/\partial z = 0$
KG & GH	$\partial h/\partial n = 0$	$\partial\varphi/\partial n = 0$
BC	$\partial h/\partial r = 0$	$\partial\varphi/\partial r = 0$
CD	$\partial T/\partial r = 0$	$\partial\varphi/\partial r = 0$
HI & AI	1,000 K	$\varphi = constant$
Probe surface	1,356 K	$\partial\varphi/\partial n = 0$

Table 2 Definition of ϕ , Γ_ϕ and S_ϕ for governing equations.

Equations	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Continuity	1	0	0
z-mom.	w	$\mu_l + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + (J \times B_\theta)_z$ $+ (\mu_l + \mu_t) \nabla^2 w$
r-mom.	v	$\mu_l + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + (J \times B_\theta)_r$ $+ (\mu_l + \mu_t) \nabla^2 v - \frac{2(\mu_l + \mu_t)v}{r^2}$
Enthalpy	h	$(k_l + k_t)/c_p$	$\sigma E^2 - q$ $+ (\mu_l + \mu_t) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$

여기서, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]는 투자율을 나타낸다. 단위시간 및 체적당 정미복사손실 (net radiation loss) q 는 준경험적 복사이송모델 (semi-empirical radiation transport model) [7]을 사용하였으며, Menart 등 [10]에 의해 주어진 아르곤의 정미방사계수를 사용하였다. 플라즈마에 노출된 탐침 표면에서의 증발은 고려하지 않았고, 탐침 표면의 온도를 구리의 용융 온도인 1,356K로 고정하여 온도장을 계산하였다.

III. 결과 및 고찰

량류어 탐침법은 플라즈마 안으로 탐침을 넣어 측정하기 때문에 탐침이 존재하지 않은 경우의 플라즈마 특성을 교란시켜 측정되는 V-I 탐침 특성 곡선의 신뢰성을 저하시킬 수 있다. 이러한 교란 정도는 플라즈마 상태와 탐침 크기에 따라 달라지겠지만 어느 정도의 열유체역학적 및 전자기적 교란을 피할 수 없다.

그림 2는 탐침 존재 여부에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 탐침이 삽입되지 않은 경우의 온도분포 (그림 2(a))를 살펴보면, 아크 수축으로 인하여 음극 끝단 근처에서 최고온도 약 25,000K를 나타내고 있다. 음극의 메커니즘과 쉬스 (sheath) 영역을 본 연구의 아크 모델에 포함되지 않았고, LTE 모델은 음극 쉬스 영역의 물리현상을 표현할 수 없기 때문에 음극 근처의 계산 결과를 신뢰할 수 없다. 하지만 플라즈마 기둥 (column)에서의 최고온도를 Haddad

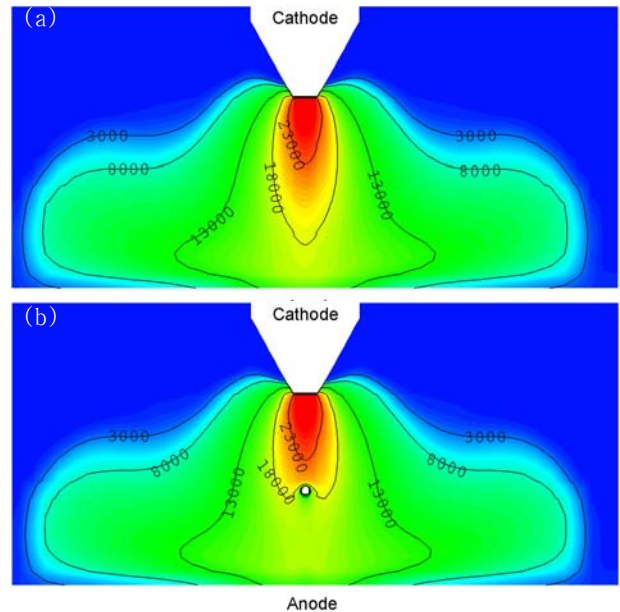


Fig 2. Temperature (K) distributions for a free-burning argon arc ($I=200$ A, $p=1$ atm). (a) without a probe. (b) with a probe.

와 Farmer [6]의 실험결과와 비교했을 때 만족스런 일치를 확인하였다. 음극에서 떨어져 있는 위치에서의 계산 및 측정 온도 사이의 일치성은 본 연구에서 적용된 수치적 방법뿐만 아니라 이론적 모델을 검증하는 것이다.

삽입된 직경 0.25 mm의 탐침은 전술한 바와 같이 탐침 재료가 용삭 (ablation)이나 증발 (evaporation)이 일어나지 않는 최대 온도인 1,356K의 일정한 표면온도를 갖는다고 가정하였으므로 탐침 근방에는 상대적으로 매우 낮은 온도를 나타내고 있다. 탐침에 의한 냉각효과는 탐침 전후의 온도분포에 심각한 교란을 초래한다 (그림 2(b)). 그 중에서도 탐침 후방의 교란이 상부의 교란보다 심각함을 알 수 있고, 이로부터 탐침이 음극에 가까울수록 교란되는 영역이 커짐을 판단할 수 있다.

그림 3은 탐침 존재 여부에 따른 축방향 속도분포를 나타내고 있다. 탐침이 삽입되지 않은 경우의 속도분포 (그림 3(a))를 살펴보면, 최대속도 약 750 m/s를 갖는 고속의 얇은 층이 중앙에 위치함을 알 수 있다. 이러한 영역은 점성 효과가 무시되는 층류 아크 플라즈마의 전형적인 형태이다. 하지만 점성 효과에 의한 주변으로의 운동량 및 에너지 이동을 정확히 고려하기 위해서는 난류모델이 반드시 해석에 필요한 도구로써 사용되어야 한다. 전술한 바와 같이 본 연구에서는 열플라즈마에 타당성이 입증된 변형된 프란틀 혼합거리 모델 [7]을 사용하였다.

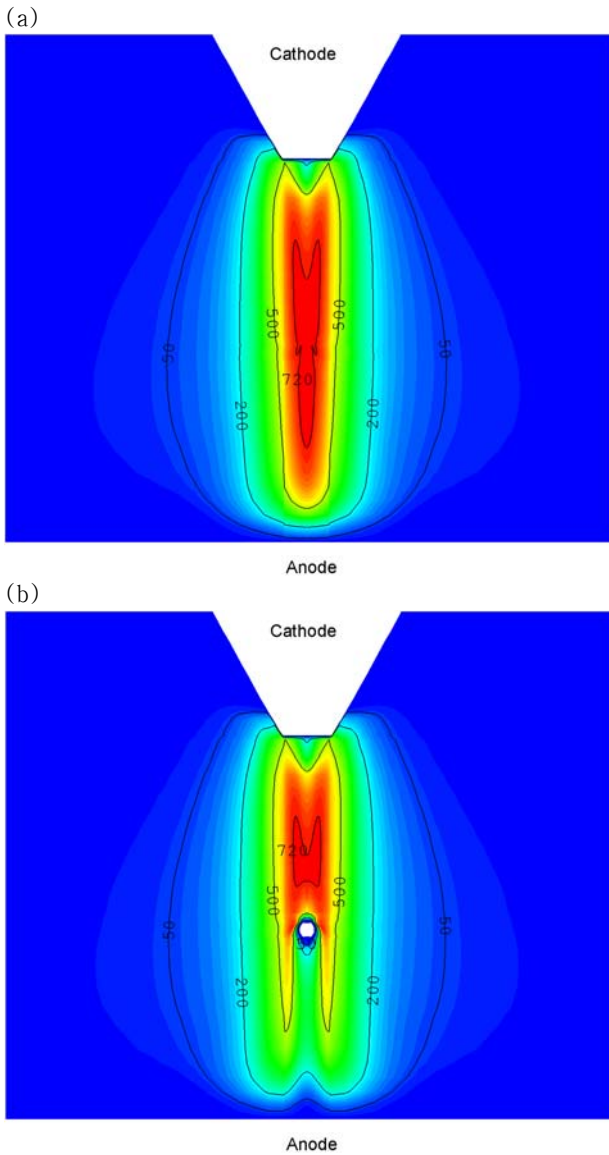


Fig 3. Axial velocity (m/s) distributions for a free-burning argon arc ($I=200$ A, $p=1$ atm). (a) without a probe. (b) with a probe.

전술한 바와 같이 탐침 삽입으로 온도장이 교란되었지만, 축방향 속도장은 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이 보다 심각하게 교란되고 있음을 확인할 수 있다. 탐침 바로 앞부분에 정체점 (stagnation point)이 발생되어 등속선을 심하게 왜곡하고 있다. 또한 탐침 후방에는 후류 (wake)가 양극을 향하여 확장되고 있다. 이와 같이 그림 2와 3을 이용하여 탐침 주변의 열유체역학적 교란 영역 정도를 확인할 수 있으며, 발생한 교란은 국소적인 것이 아님을 알 수 있다. 따라서 탐침이 없을 때 교란되지 않은 온도와 속도를 사용하는 전통적인 경계층 이론은 보다 더 두꺼운 열경계

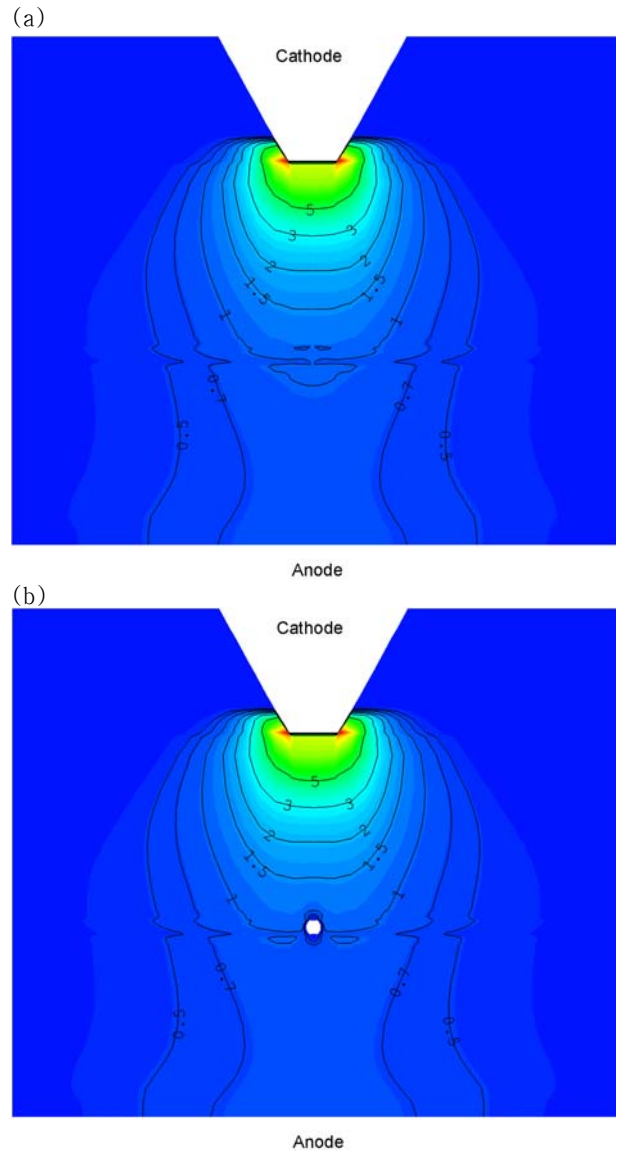


Fig 4. Current density (10 kA/m^2) distributions for a free-burning argon arc ($I=200$ A, $p=1$ atm). (a) without a probe. (b) with a probe.

층을 예측할 것이다. 이것은 탐침 직전에서 속도가 온도보다 훨씬 더 교란되는 것으로 나타난 본 연구 및 참고문헌 [8]의 결과들과 일치하지 않는다. 따라서 탐침 삽입에 의한 플라즈마 특성에의 열유체역학적 교란을 고려해야 한다.

그림 4에는 탐침 존재 여부에 따른 전류밀도분포를 나타내고 있다. 삽입된 탐침은 플라즈마의 열유체역학적 특성을 교란할 뿐만 아니라, 플라즈마 발생 영역의 전기장을 변화시키고 입자의 분포와 에너지에 영향을 준다. 탐침에 인가된 전압에 의하여 흐르는 전류를 측정해야 하는데 ($V-I$ 탐침 특성 곡선), 그림 4(b)에서 볼 수 있듯이 삽입된 탐침

으로 인하여 전류밀도 또한 교란된다. 즉, 측정에서 얻은 전류값 또한 교란 상태의 값을 나타낸다. 탐침 V-I 특성은 탐침 주변의 불균일 플라즈마 조건을 현실성 있게 반영해야 하지만, 전통적 탐침 이론에서는 탐침 주변의 플라즈마 상태가 균일하다고 가정하므로 교란 영역에서 측정된 탐침 데이터를 이용하여 단일 플라즈마 변수들을 획득하는 것은 불가능하다. 따라서 측정된 불균일 플라즈마 변수 분포를 교란되지 않은 플라즈마 변수들과 연결할 수 있는 방법이 수치해석을 통해 확립되어야 탐침법이 높은 신뢰도를 갖고 플라즈마 변수를 예측하는데 사용될 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 대기압 아르곤 자유 연소 아크에 삽입된 랑뮤어 탐침이 플라즈마 특성에 미치는 열유체역학적 교란 영향에 관한 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 탐침에 의한 냉각효과는 탐침 전후의 온도분포에 심각한 교란을 초래하였고, 정체점 및 후류의 발생으로 인하여 측방향 속도분포는 보다 심각하게 교란되었다.

2) 교란 영역은 탐침 후방의 교란이 상부의 교란보다 심각함을 알 수 있었고, 이로부터 탐침이 음극에 가까울수록 교란되는 영역이 커짐을 판단할 수 있었다.

3) 탐침 주변의 국소적이 아닌 열유체역학적 교란 영역의 정도를 확인할 수 있었다. 따라서 탐침 주변의 플라즈마 상태가 균일하다고 가정하는 전통적 탐침 이론을 이용하면 신뢰성 있는 플라즈마 변수들을 획득하는 것은 불가능하다.

4) 이와 같은 전통적인 경계층 이론은 보다 더 두꺼운 열경계층을 예측할 것이며, 이것은 탐침 직전에서 속도가 온도보다 훨씬 더 교란되는 것으로 나타난 본 연구 및 선행 연구의 결과들과 일치하지 않는다. 따라서 탐침법의 신뢰성을 높이기 위해서는 탐침 삽입에 의한 플라즈마의 열유체역학적 교란을 고려해야 한다.

5) 측정된 불균일 플라즈마 변수 분포를 교란되지 않은 플라즈마 변수들과 연결할 수 있는 방법을 수치해석을 통하여 확립할 수 있도록 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 강릉대학교 학술연구조성비지원에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

- [1] M. I. Boulos, P. Fauchais, and E. Pfender, *Thermal Plasmas*, Plenum Press (1995).
- [2] J. H. Boo, C. H. Heo, Y. K. Cho, J. S. Yoon, and J. G. Han, *J. Korean Vacuum Society* **15**(6), 563 (2006).
- [3] P. M. Chung, L. Talbot, and K. J. Touryan, *Electrical Probes in Stationary and Flowing Plasmas*, New York: Springer-Verlag (1975).
- [4] A. Grill, *Cold Plasma in Material Fabrication: From Fundamentals to Applications*, John Wiley & Sons, Inc. (1994).
- [5] K. C. Hsu, K. Etemadi, and E. Pfender, *J. Appl. Phys.* **54**, 1293 (1983).
- [6] G. N. Haddad and A. J. D. Farmer, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **17**, 1189 (1984).
- [7] J. C. Lee, J. H. Boo, and Y. J. Kim, *J. Korean Physics Society* **51**, 972 (2007).
- [8] M. T. C. Fang, J. L. Zhang, and J. D. Yan, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33**, 1431 (2005).
- [9] J. C. Lee and Y. J. Kim, *Transaction of the KSME(B)* **31**, 832 (2007).
- [10] J. Monart, J. Heberlein, and E. Pfender, *Plasma Chem. Plasma Process* **16**, 245 (1996).

Numerical Study on the Characteristics of Thermal Plasmas Disturbed by Inserting a Langmuir Probe

J. C. Lee^{1*} and Y. J. Kim²

¹*School of Mechanical and Automotive Engineering, Kangnung National University, Wonju 220-711*

²*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746*

(Received March 11, 2008)

Measurements with a Langmuir probe, which are the most often used procedures of plasma diagnostics, can disturb plasma flows and change its characteristics quite a little because the probe should be inserted into thermal flowing plasmas. In this study, we calculated the characteristics of thermal plasmas with and without the probe into an atmospheric argon free-burning arc numerically, and investigated aerodynamic and thermal disturbances with temperature and axial velocity distributions. For the modelling of thermal plasmas, we have made two governing equations, which are on the thermal-flow and electromagnetic fields, coupled together with a commercial CFD package and user-coded subroutines. It was found that thermal disturbances happened to both sides of the probe, before and behind, seriously. Due to the aerodynamic disturbance, we could find that there were the stagnation point in front of the probe and the wake behind it. Therefore, aerodynamic and thermal disturbances caused by the probe insertion should be considered to increase the reliability of the probe diagnostics.

Keywords : Thermal plasma, Langmuir probe, free-burning arc, aerodynamic and thermal disturbances, computational fluid dynamics

* [E-mail] jclee01@kangnung.ac.kr