

제어체적법에 의한 Ar 아크 플라즈마의 특성 계산

°김외동, 고광철, 강형부
한양대학교 전기공학과

Numerical calculations of characteristics of Argon arc plasma using the control volume method

°Kim Oe Dong, Ko Kwang Cheol, Kang Hyung Boo

Dept. of Electrical Eng., HanYang Univ.

Abstract

In this paper, argon gas was used for numerical analysis of an arc in a cutting plasma torch driven by constant current. We established nozzle-constricting type torch domain and calculated steady state characteristics of argon arc plasma using the control volume method(CVM).

For simplicity, we assumed that the flow field is laminar and the local thermodynamic equilibrium (LTE) prevails in all domain regions. We also neglected cathode-fall and anode-fall effects. Considering magnetic pinch effect and viscosity effect, we solved the momentum equation. Voltage drop in the arc column due to input current was calculated from the temperature field obtained by the energy balance equation.

1. 서론

GTAW(or TIG-Welding)에서의 자유 연소 아크(free burning arc)에 대한 많은 이론적인 연구가 행해졌으나 기본적으로 음극 표면에서의 전류밀도 분포를 가정하였다. 그러나 최근의 해석에서는 이러한 가정에 의하지 않고 Ohm의 법칙으로부터 전류 밀도를 구하여 아크의 특성을 계산하였다[1]. 이 경우 음극 표면의 온도가 입력값으로 필요하고, 아크 칼럼 영역은 국부적 열평형 상태를 가정하여 그 특성을 구하였다.

아크 부하의 변동에 관계없이 일정한 전류값으로 구동되는 용접기 및 절단기는 수동용으로 적합하다. 이러한 수동용 토치에서 전류를 일정하게 하면 전극-노즐의 구조 및 작동 가스의 공급에 따라서 전압 분포가 변하지만 경향은 비슷하게 나타나고 있다.

본 논문에서는 아크 플라즈마의 전압 분포를 계산하기 위하여 노즐 제한형 플라즈마 토치를 설정하였다. 음극 표면에서의 온도를 가정하지 않고 음극 내부의 Joule 가열 효과로부터 구하였고, 2차원 전 영역에 대

한 아크의 온도 분포를 계산하였다. 아크 칼럼부의 전압 강하는 전류 연속식으로부터 구하였다. 해석 영역은 음극과 아크 칼럼 및 노즐 부분으로 구분하였고, 입력 가스 유량을 30 l/min으로 하였다. 또한 아크 칼럼부와 접한 양극의 영향은 무시하였다. 음극과 노즐은 전기전도도, 열전도도가 좋은 구리를 사용하였고, 입력 전류 50 A에 대한 해석을 하였다.

2. 이론

플라즈마 토치에서의 아크 해석을 간단히 하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

가정

- a. 아크는 축대칭이다.
- b. 아크는 국부적 열평형 상태(LTE)에 있다.
- c. 플라즈마 흐름은 laminar이고, 질량 보존식, 운동량 방정식, 에너지 보존식에 의해 지배된다.
- d. 작동 가스의 입자종은 Ar, Ar+, 전자로 구성되어 있다.
- e. Ar 가스의 모든 물리 정수는 온도와 압력의 함수이다.
- f. 이온 전류는 무시하였다.

토치는 축대칭이므로 좌표계는 원통좌표계를 사용하며, 좌표계 (r, z)에서의 질량 보존 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다.

질량 보존식:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho v_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \tag{1}$$

반경방향 운동량 보존식:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho v_r^2) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z v_r) = -\frac{\partial P}{\partial r} - j_z B_0 \tag{2}$$
$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(2\eta r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right\} - 2\eta \frac{v_r}{r^2}$$

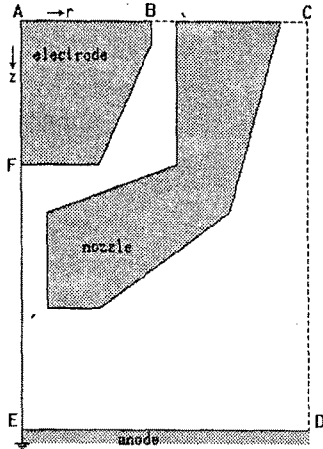


그림 1 플라즈마 토치의 해석 영역 및 경계면

축방향 운동량 보존식:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z^2) = -\frac{\partial P}{\partial z} + j_r B_\theta \quad (3)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} (2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right) + \rho g$$

에너지 보존식:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r c_p T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z c_p T) = \quad (4)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \kappa \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{j_r^2 + j_z^2}{\sigma} - U$$

(1)~(4)의 방정식에서 기본적인 네 개의 변수는 압력 P , 반경방향 속도 v_r , 축방향 속도 v_z , 온도 T 이다. 물리 정수는 질량밀도 ρ , 점성도 η , 열용량 c_p , 방사광 손실 U , 열전도도 κ , 전기전도도 σ 이다. B_θ 는 전류에 의한 회전자계이고, j_r , j_z 는 각각 반경방향, 축방향 전류밀도이다. 식 (2)~(4)에 필요한 전류밀도 j_r , j_z 는 전류 연속식에서의 전압과 Ohm의 법칙으로부터 얻을 수 있다.

전류 연속식:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma \frac{\partial V}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\sigma \frac{\partial V}{\partial z}) = 0 \quad (5)$$

Ohm의 법칙:

$$j_r = -\sigma \frac{\partial V}{\partial r} \quad j_z = -\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \quad (6)$$

전계 E 는 $-\nabla V$ 로 주어진다. 식 (2)와 (3)을 풀기 위해 필요한 회전 자계 B_θ 는 Maxwell 방정식으로부터 얻어진다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\theta) = \mu_0 j_z \quad (7)$$

여기서 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$ 는 자유 공간의 투자율이다.

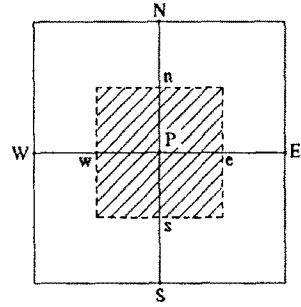


그림 2 이산화 격자점 구조

3. 수치 해석

가. 경계조건 및 Ar 물리 정수

그림 1은 해석 영역 모델과 경계면을 나타내고 있다 (어두운 부분은 음극과 전극을 나타낸다). 포텐셜 V 의 분포를 구하기 위해 양극 표면에서의 포텐셜을 0으로 놓았고, 경계면 CD에서 $\partial V / \partial r = 0$ 으로 놓아 전류가 경계면을 흐르지 못하도록 하였다. AB영역에서 입력 전류를 음극 단면적으로 나눈 전류밀도 $j_0 = -\partial V / \partial z$ 를 경계 조건으로 취하였다. $r=0$ 에서 축대칭을 가정하였으므로 $\partial V / \partial r = 0$ 으로 놓는다.

플라즈마 속도 계산을 위해서 음극과 노즐의 내부 영역은 해석에서 제외하였다. BC 경계에서의 축방향, 반경방향 속도를 0으로 놓았다. 전극과 노즐사이의 압력은 $P_m = 3 \text{ atm}$ 으로 하였다. 각 변수에 대한 경계 조건을 표 1에 나타내었다.

표 1 각 변수에 대한 경계 조건

	AB	BC	CD	DE	EA
V	$\sigma (\partial V / \partial z) = -j_0$	$\partial V / \partial z = 0$	$\partial V / \partial r = 0$	$V = 0$	$\partial V / \partial r = 0$
T	$T = 1000K$	$T = 1000K$	$T = 1000K$	$T = 1000K$	$\partial T / \partial r = 0$
P		$P = P_m$	$P = P_0$		$\partial P / \partial r = 0$
j_r	$j_r = 0$	$j_r = 0$	$j_r = 0$	$j_r = 0$	$j_r = 0$
j_z	$j_z = -j_0$	$j_z = 0$	$j_z = 0$	$j_z = 0$	$\partial j_z / \partial r = 0$
v_r		$v_r = 0$	$v_r = 0$	$v_r = 0$	$v_r = 0$
v_z		$\partial (\rho v_z) / \partial z = 0$	$v_z = 0$	$v_z = 0$	$\partial v_z / \partial r = 0$

P_0 는 1atm, $j_0 = I / (\pi R_c^2)$ 이다. 여기서 I 는 입력 전류, R_c 는 음극의 반경이다.

나. 수치 해석 방법

(1)~(7)의 편미분 방정식이 그림 2와 같은 사각형 격자 구조에 대해 정식화되었다. 온도, 압력 및 포텐셜은 실선의 교점에서 표현된다. 빗금친 부분은 미소 제어체적, 점선은 제어체적면을 나타내고 있으며 e점에서 v_r , j_z 를, n점에서 v_z , j_r 를 계산하였다. 보존 방정식을 이산화하는 방법은 Patankar(1980)의 제어체적법[2]을 사용하였다. 계산에 사용된 제어체적면의 v_r , v_z 는 제어체적에 대한 열유속, 질량 및 전류의 전달을 표현하는데 도움이 된다.

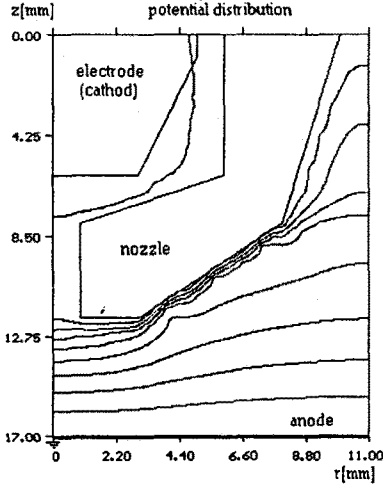


그림 3 전류 50 A에 대해서 계산된 등전압 분포 (포텐셜 간격은 18 V)

(1)~(7)의 방정식을 각 제어체적에 대해서 이산화하면 다음과 같은 형식의 방정식이 된다.

$$a_r \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (8)$$

여기에서 ϕ 는 v_r, v_z, T, P, V 를 나타낸다. ϕ 의 첨자는 제어체적의 중심점 P 또는 이웃하는 제어체적의 중심점 N, S, E, W에서의 ϕ 값을 나타낸다.

각 방정식의 해는 반복법으로 풀었다. 질량 보존식과 운동량 방정식은 밀접하게 결합되어 있으므로 수치적인 안정성을 위해 속도와 압력값을 동시에 바꿔주어야 한다. Patankar에 의해 제안된 SIMPLE법[2]을 사용하여 질량 보존식을 만족하는 운동량 방정식을 계산하였다.

수치 반복 과정은 다음과 같다.

- 1) 초기에 임의의 P, v_r, v_z, T, V 값을 선택한다.
- 2) 온도 T , 압력 P 에서의 Ar 플라즈마의 물리 정수값을 계산한다[3].
- 3) 식 (5)로부터 전압 분포 $V(r, z)$ 를 구한다. j_r, j_z 및 B_θ 값을 식 (6)과 (7)으로부터 얻는다.
- 4) SIMPLE법을 사용하여 식 (1)~(3)으로부터 v_r, v_z 및 P 의 새로운 값을 구한다.
- 5) 식 (4)로부터 새로운 T 값을 얻는다.
- 6) 위의 과정을 2)번 과정부터 되풀이한다.

해석 영역은 34×52 크기의 격자점으로 구성하였고, 각 격자점 간격 $\Delta r, \Delta z$ 는 0.333 mm로 같게 정하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

입력 전류 50 A, 전극-노즐 간격 2 mm, 음극-양극 간격 11 mm, 토치높이 5 mm, 노즐구멍 지름 2 mm, 노즐 구속 길이 4 mm, 입력 유량 30 l/min에 대해서 계산을 하였다.

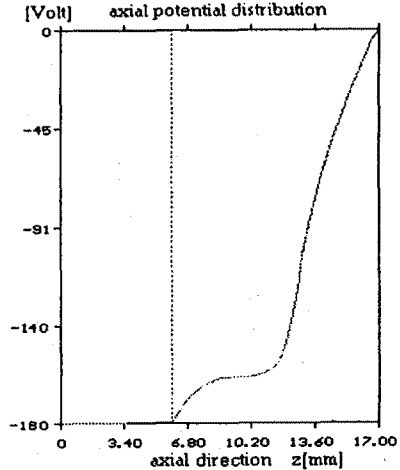


그림 4 전류 50 A, 경계면 EA($r=0$)에서의 축방향 전계 (점선은 전극 표면, $z=6$ mm)

그림 3은 아크 전압 분포를 나타낸다. 계산된 전체 아크 전압은 약 150 V이다. 그림 4는 $r=0$ 에서의 축방향 전압 분포이다. 여기서 점선은 전극 표면을 나타낸다. 음극의 전압 값은 약 -181 V이고, 노즐의 전압 값은 약 -150 V이다. 노즐 안쪽에 전계가 거의 0인 영역이 존재하고 등전압선이 대부분 노즐 밖으로 밀려 있어 마치 하나의 전극처럼 작용해 유효 전극거리가 가까워지는 효과가 일어나고 있다.

5. 결론

노즐 제한형 토치에서의 Ar 아크 플라즈마의 물리적 특성을 계산하기 위하여 2차원 영역에 대해서 각 보존 방정식들을 이산화하였다.

음극 표면의 온도를 가정하지 않고 에너지 보존식으로부터 온도 분포를 구했으며, 전류 연속식으로부터 아크의 전압 분포를 얻었다.

전류 50 A에 대한 해석 결과, 등전압선은 대부분 노즐 밖으로 밀려나 노즐은 가상 전극처럼 동작하는 것을 알 수 있었다.

보다 정확한 계산을 위해서는 음극 쉬스와 양극 쉬스 영역의 영향을 고려할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] J. J. Lowke, P. Kovitya and H. P. Schmidt, *J.Phys.D:Appl.Phys.*, vol.25, pp1600-1606, 1992
- [2] S. V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, 1980
- [3] J. F. Lancaster, "The Physics of Welding", Pergamon Press, 1984