

직류 전기 아크로에서의 플라즈마 특성에 관한 수치해석

이 종 훈*¹, 한 병 윤*¹, 곽 수 민*¹, 이 연 원*², 김 찬 옥*³

Numerical Analysis on Plasma Characteristics of a DC Electric Arc Furnace

J. H. Lee, B. Y. Han, S. M. Kwak, Y. W. Lee and C. W. Kim

In order to analyze the heat transfer phenomena in the plasma flames, a mathematical model describing heat and fluid flow in an electric arc has been developed and used to predict heat transfer from the arc to the steel bath in a DC Electric Arc Furnace. The arc model takes the separate contributions to the heat transfer from each involved mechanism into account, i.e. radiation, convection and energy transported by electrons. The finite volume method and a SIMPLE algorithm are used for solving the governing MHD equations, i.e., conservation equations of mass, momentum, and energy together with the equations describing a $k-\epsilon$ model for turbulence. The model predicts heat transfer for different currents and arc lengths. Finally these calculation results can be used as a useful insight into plasma phenomena of the industrial-scale electric arc furnace. From these results, it can be concluded that higher arc current and longer arc length give high heat transfer.

Key Words: 플라즈마(Plasma), 전기 아크로(Electric Arc Furnace), 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)

1. 서 론

플라즈마란 초고온에서 음전하를 가진 전자와 양전하를 가진 이온으로 분리된 기체 상태를 말한다., 최근 들어 플라즈마를 이용한 대체 에너지, 신재료 개발, 반도체 소자제조, 금속제련 공정, 환경분야 등에서 플라즈마를 이용한 기술개발이 다양하게 이루어지고 있고, 또한 컴퓨터의 급속한 처리속도와 용량이 발전하여 플라즈마의 특성을 전산 모델링에 수치적으로 해석하여 좀 더 정확한 플라즈마 현상들을 관찰하며, 연구하고 있다.

플라즈마를 수치적으로 해석하기 위한 이론적 접근방법으로는 플라즈마 내에서 일어나는 아크와 기체간의 상호작용, 유체역학적 성질, 난류현상, 주변기체의 혼합영향, 플라즈마 입자간의 상호작용을 유발하는 각 입자들의 운동 및 에너지를 전부 고려하여 수치해석을 수행할 수 있다.

J. Szekely, J. W. Mckelliget 그리고 M. Choudhary 등 선행연구자들은 아크 기둥 환경에 대한 실험식을 구하고, 중요한 인자인 물성치는 상수로 취급하여 해석을 시도하였으며, B. Liu, T. Zhang 와 D. T. Gavne는 플라즈마 제트의 유동장에 대해서만 연구하였다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ 본 연구는 금속제련 공정에 사용되고 있는 직류 전기 아크로를 대상으로 아크 방전에 의해 발생하는 플라즈마의 열 유동 특성을 수치적으로 해석하여 플라즈마 화염의 열전달 특성을 분석하고 나아가서는 교류 전기 아크로의 해석과 더불어

*1 학생회원, 부경대학교 대학원 기계공학부

*2 정회원, 부경대학교 기계공학부

E-mail : ywlee@pknu.ac.kr

*3 (재)포항산업과학연구원

전기 아크로의 최적 시스템 설계나 최적 공정변수를 산출하는데 도움이 되고자 한다.

2. 본 론

2.1 직류 전기 아크로 모델링

본 수치해석은 2차원 원통좌표계로서 그 계산영역을 Fig. 1에 나타내었다. 계산영역은 크게 세 부분으로 구분하였는데, 음극부(cathode) 표면에서 z축으로 가장 인접한 cell에 열생성항을 추가하였고, 양극부 표면에서 가장 인접한 cell에 열소실항을 적용하였다. 음극부의 크기는 축방향 및 반경방향 (r)으로 각각 5cm×8cm 이며 반경방향 계산영역은 대칭축을 기준으로 0.5m 까지 확장하였다. 플라즈마 아크 제어 변수인 아크길이(arc length)는 15cm~30cm로 변화시켰고, 전류세기는 32KA ~ 44KA까지 변화시켰다.

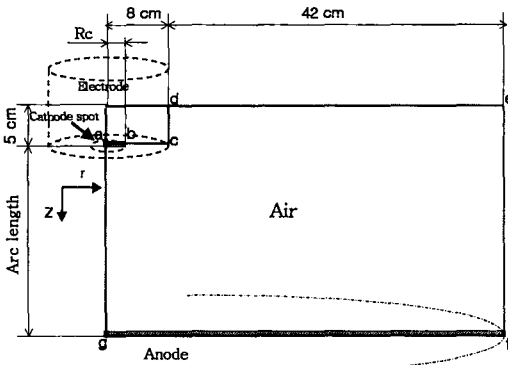


Fig.1 Calculation domain in a DC arc furnace

그리고 본 수치계산을 위하여 몇 가지 가정들을 사용하였다.

- (1) 플라즈마는 하나의 유체로서 처리하며 열물 생성하는 온도의 함수이다.
- (2) 플라즈마는 축대칭이고 2차원 정상상태이다.
- (3) 플라즈마는 국소열평형(Local Thermodynamic Equilibrium, LTE)상태에 놓여있다.
- (4) Steel 표면인 양극에서 아크제트의 충돌에 의한 자유표면의 변화는 무시한다.

2.2 수치 기법

본 연구에서는 직류 전기 아크로에서 발생하는 플라즈마를 대상으로 자기유체역학(MHD) 이론 방정

식과 난류 현상을 모사하기 위해 2 방정식 모델인 standard $k-\epsilon$ 모델을 이용하였고, 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식을 유한 체적법을 이용하여 차분화하였고, Upwind scheme을 통해 대류항과 확산항을 차분화하였고, 압력장을 풀기 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 본 연구에서는 상용코드인 PHOENICS V3.3을 기본으로, 운동량방정식 및 에너지 방정식에 수정을 요하는 추가항을 코딩하여 적용시켰다. 코드 검증을 위해서 작은 규모의 플라즈마 화염에 대한 온도 및 속도 실험결과와 비교하였다.

2.3 지배 방정식

축대칭인 원통형 좌표계에서 연속(1), 축방향(2)과 반경방향 운동방정식(3) 및 에너지 방정식(4)은 다음과 같다.

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

여기서 ρ 는 밀도, v, w 는 각각 축방향 및 반경방향의 플라즈마 속도성분을 나타낸다.

$$\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v w)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu_{eff} \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + J_r B_\theta \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w^2)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right] + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu_{eff} \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right) \right] - \mu_{eff} \frac{2v}{r^2} - J_z B_\theta \tag{3}$$

여기서 P 는 압력, μ_{eff} 는 층류점성계수와 난류점성계수의 합인 유효점성계수를 나타내고, J_r 과 J_z 은 반경방향 및 축방향 전류밀도, B_θ 는 접선방향으로의 자기유속밀도이며 $J_r B_\theta$, $J_z B_\theta$ 는 각각 계산영역 내 전류밀도 및 유도자기장에 의해 발생하는 Lorentz 힘의 축방향 및 반경방향 성분을 나타낸다.

$$\frac{\partial(\rho v h)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v h)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{k} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{k} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \left(\frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma_e} \right) - \frac{5}{2} \frac{k_b}{e} \left(\frac{J_r}{C_p} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{J_z}{C_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \tag{4}$$

여기서 h 는 엔탈피, σ_e 는 전기전도도, k 는 열전도도

를 나타낸다. 상기 에너지방정식에 전자기적 특성에 의한 열생성항으로 Joule heating항, Thompson effect항으로 구성되어 있다.

2.4 경계조건 및 열물성치

본 수치계산에 적용되는 경계조건을 Table 1에 요약하여 나타내었다. 플라즈마의 열물성치는 M. Capitelli, G. Colonna, C. Gorse, A 그리고, D'Angola가 제안한 온도범위 50-100,000K 내에서 이론적으로 계산한 점도, 열전도도 및 전기전도도에 수정을 가해 사용하였고, 온도에 따른 공기의 밀도변화는 이상기체식으로 계산하였다.⁽⁴⁾

Table 1 Boundary conditions

	v	w	h
a-b	0 m/s	0 m/s	T = 4000K
b-c	0 m/s	0 m/s Q = 0	T = 1800K
c-d	0 m/s	0 m/s Q = 0	T=1800K
d-e	P=1 atm		$\frac{\partial h}{\partial z}$
e-f	P=1 atm		$\frac{\partial h}{\partial r}$
f-g	0 m/s	0 m/s	T=1800K
g-a	0 m/s	$\frac{\partial w}{\partial z}$	$\frac{\partial h}{\partial z}$

2.5 전자기장 계산

Fig. 1에서 a-b 구간에 해당하는 음극점 반경 (cathode spot radius) R_c 는 G. R. Jordan, B. Bowman 그리고, D. Wakelam이 제안한 식을 사용했고, 아크 반경 R 은 J. W. Mckelliget, J. Szekely가 제안한 식을 사용하여 결정하였다. 여기서 I 는 인가 전류이며, J_c 은 음극점에서의 평균 전류밀도(약 4.4 KA/cm^2)이다.

$$R_c = \sqrt{\frac{I}{\pi J_c}} \quad (5)$$

$$R = R_c \left(1 + \sqrt{\frac{z}{R_c}} \right) \quad (6)$$

인가전류는 음극점 반경을 통해 방전되고, 전류의 정의에 의해 인가전류는 다음과 같다.

$$I = \int_A J \cdot ndA \quad (7)$$

여기서, n 은 z 축방향의 단위벡터이다.

축방향 전류밀도 J_z 는 아크의 반경방향으로 포물선 형태를 가지고 $r=0$ 일 때 $\frac{\partial J_z}{\partial z}$, $r=R$ 일 때 $J_z=0$ 이라 가정하면 식(7)에 의해 식(8)의 형태로 표현된다.

$$J_z = \frac{2I}{\pi R^4} (R^2 - r^2) \quad \text{when } r \leq R$$

$$J_z = 0 \quad \text{when } r > R \quad (8)$$

반경방향 전류밀도 J_r 은 MHD 근사식인 $\nabla \cdot J=0$ 인 조건으로부터 식(9)와 같이 결정된다.

$$J_r = \frac{I}{\pi} \left(\frac{r}{R^3} - \frac{2r^3}{3R^5} \right) \sqrt{\frac{R_c}{z}} \quad \text{when } r \leq R$$

$$J_r = 0 \quad \text{when } r > R \quad (9)$$

축대칭에서 방위각방향 자기유속밀도 B_θ 는 암페어 법칙에 의해 다음과 같다.

$$B_\theta = \frac{\mu_p}{r} \int_0^r J_z r dr \quad (10)$$

여기서, μ_p 는 투자율이다.

2.6 음극부 생성항

음극부에서는 플라즈마를 이온화시키기 위해 필요한 열에너지를 공급해주어야 하는데 본 연구에서는 $r \leq R_c$ 인 영역에서 J.W. Mckelliget와 J. Szekely가 제안한 식을 사용하였다.

$$Q_c = |J_c| \frac{5}{2} \frac{k_b}{e} (T_c - T_{cathode}) \quad (11)$$

여기서, T_c 는 음극부 내의 온도, $T_{cathode}$ 는 음극 표면 온도, k_b 는 볼츠만상수, e 는 전하량이다.

2.7 양극부 소실항

양극 근처에서는 대류, 복사, Thompson 효과 그리고 전자가 Steel 내부로 소멸될 때의 열손실이 주요 열에너지 손실 메카니즘으로 판단된다. 본 논문에서는 대류, Thompson 효과, 전자소멸에 따른 열손실 표현식만을 정리하고 복사는 PHOENICS의 IMMERSOL 복사모델을 사용했다.

$$Q_{con} = \frac{0.915}{k_w} \left(\frac{\rho_a \mu_{la}}{\rho_w \mu_{lw}} \right)^{0.43} \left(\frac{\rho_w \mu_{lw} v_a}{r} \right)^{0.5} c_p (T_a - T_{anode}) \quad (12)$$

$$Q_{Thompson} = \frac{5}{2} \frac{k_b}{e} J_A (T_a - T_{anode}) \quad (13)$$

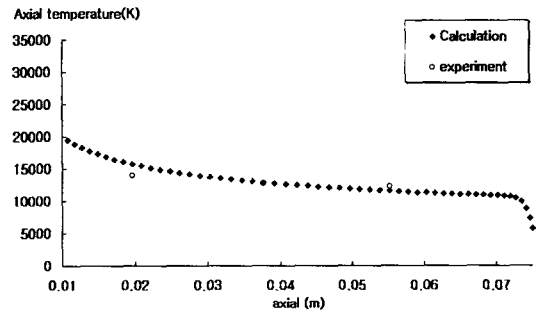
$$Q_A = J_A (V_A + q_A) \quad (14)$$

식(12)에서 w 는 steel 표면, a 는 양극부 내부값을 나타낸다. 식 (13)에서 J_A 는 양극에서의 전류밀도이고, T_{anode} 는 steel 표면온도이다. 식(14)에서 V_A , q_A 는 모두 4 V인 값을 갖는다고 가정하였다.

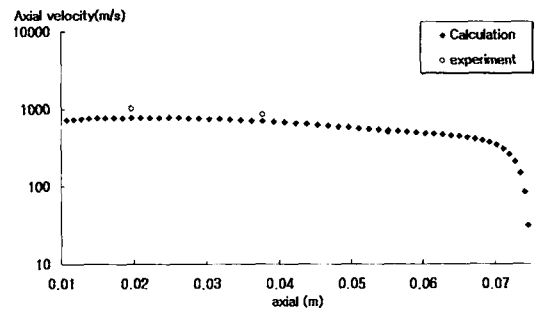
3. 계산결과 및 고찰

3.1 수치 모델의 검증

수치해석 모델의 타당성을 검증하기 위해 2.16KA의 전류크기 및 7cm의 아크길이를 갖는 전기 아크로의 온도 및 속도에 대해 작은 크기의 직류 전기 아크로의 온도 및 속도에 대한 J. W. Mckelliget와 J. Szekely의 실험 데이터와 수치계산결과를 비교하였다.⁽¹⁾ 최대온도는 음극부에서 30,826K으로 나타났으며 최대속도는 770m/s로 계산되었다.



(a) Temperature



(b) Axial velocity

Fig. 2 Comparison between experiment and omputation

양극부로 내려갈수록 온도와 속도가 줄어드는 것을 알 수 있었다. 수치계산 결과와 실험적으로 구한 결과치가 양호하게 일치함을 알 수 있다.

3.2 직류 아크 특성

전류세기 I=36KA이고 아크길이 L=25cm인 경우를 기준 화염으로 설정하여, 그 수치해석 결과를 Fig. 3 ~ Fig. 5에 나타내었다.

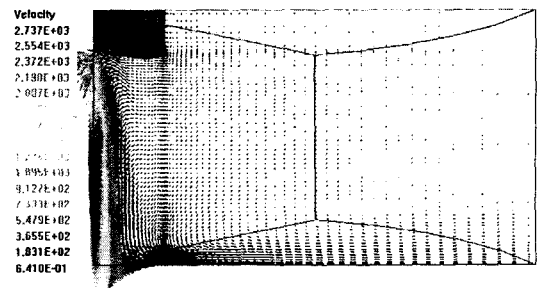


Fig. 3 Velocity vectors in the arc Arc current is 36KA and arc length 25cm



Fig. 4 Temperature contours in the arc Arc current is 36KA and arc length 25cm

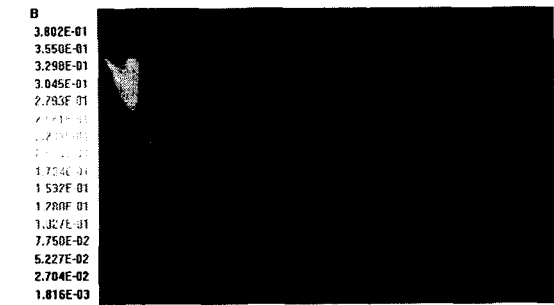


Fig. 5 Azimuthal magnetic field contours in the arc region. Arc current is 36KA and arc length 25cm

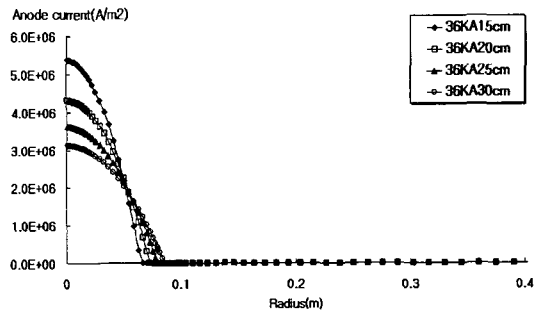
Fig. 3와 4는 속도 벡터와 온도장의 계산 결과를 나타낸다. 최대온도는 음극부, 최대속도는 음극표면에서 0.061m에서 각각 형성되며, 최대속도는 2,737m/s 이고, 최대온도는 31,860K이다. Fig 5는 자속밀도를 나타내며, 식(10)의 계산 결과이다. 음극부 부근에서 최대 0.38T를 갖는 것을 알 수 있다.

3.3 아크길이 및 전류세기에 따른 특성

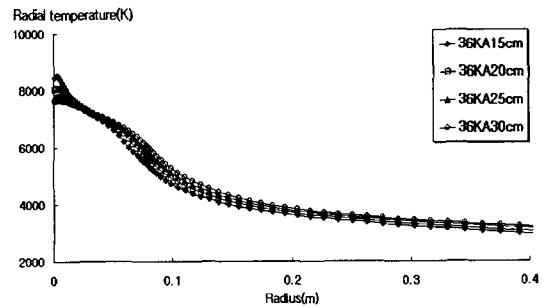
3.3.1 아크길이 변화에 대한 플라즈마 특성

Fig. 6 (a)는 아크반경식(6)에서 아크 반경은 z축에 비례하여 증가하고, 아크 길이가 줄어들수록 극간의 전압강하는 감소된다. Anode 표면의 전류밀도는 전류소멸, 톰슨 효과에 의한 열유속을 일으키며 아크 길이가 클수록 Bath 표면에 전달되는 이들의 열유속은 광범위해진다. Fig. 6 (b)를 보면 아크길이가 짧을수록 최대온도가 높다. 이것은 전자소멸, 톰슨효과에 의한 열유속의 비례상수인 전류밀도가 Fig. 6 (a)에서와 같고, 또한 Bath 표면에서 대류 열유속은 비례상수인 반경방향속도성분과 아크반경 내에서는 아

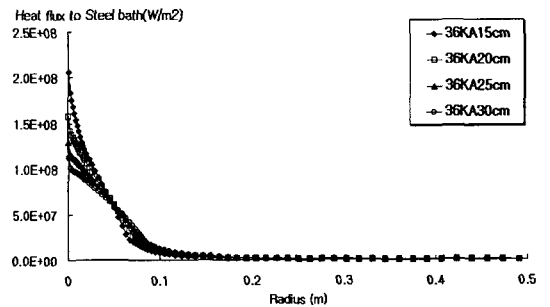
크길이가 짧을수록, 아크반경 밖에서는 아크길이가 길수록 bath 표면으로 전달양이 크다. Fig. 6 (c)에서 총열유속은 bath 표면온도 곡선과 양상이 같다. 아크 길이에 따른 총열유속의 변화는 대류 열유속과 복사 열유속이 지배적이다. Fig. 6 (d)에서 bath 표면으로 전달되는 누적 열유속을 나타낸다. 전류세기가 고정되어 있을 경우 아크길이가 길 경우 누적 열유속이 증가하는 것을 알 수 있다.



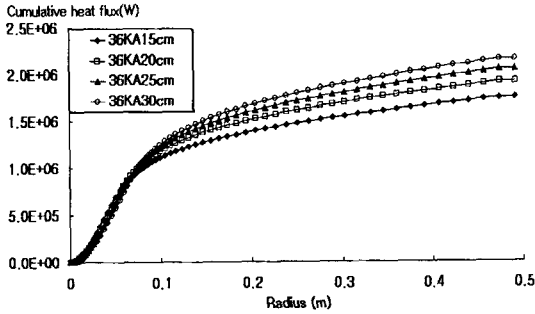
(a) Anode current density



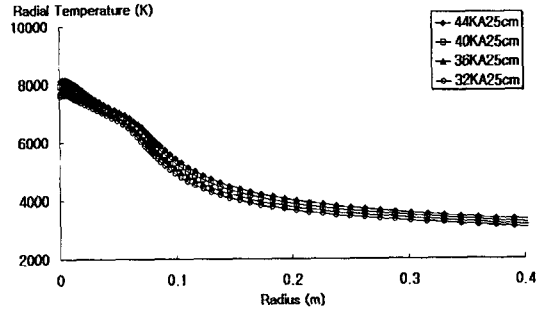
(b) Radial Temperature



(c) Heat transfer from the arc to the bath



(d) Cumulative heat transfer

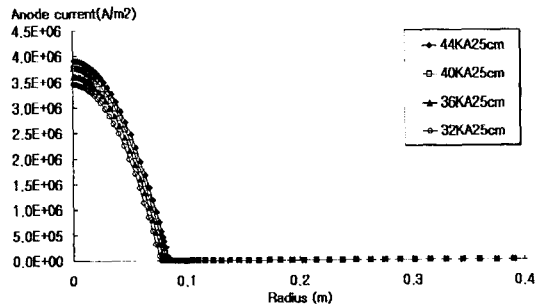


(b) Radial Temperature

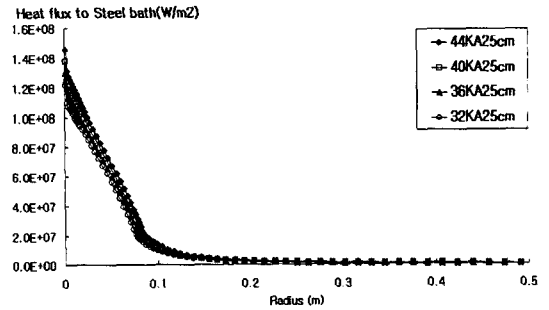
Fig. 6 Characteristics accompanied by the change due to the arc length

3.3.2 전류세기 변화에 대한 플라즈마 특성

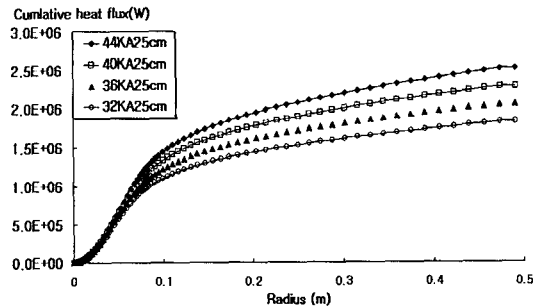
Fig. 7 (a)를 보면 알 수 있듯이 전류밀도는 아크 길이 변할 때보다 변동폭이 적고, 아크반경은 전류세기보다는 아크길이가 주요변수 임을 알 수 있다. Fig. 7 (b)에 전류세기가 클수록 표면 온도가 높음을 알 수 있다. Fig. 7 (c)는 총열유속이며, bath 표면에서의 열전달은 대류, 복사, 전자소멸, 톰슨효과 순으로 그 크기를 가지며, Fig 7 (d)는 bath 표면으로 전달되는 누적 열유속으로 전류 세기가 클수록 누적 열유속이 증가하는 것을 알 수 있다.



(a) Anode current density



(c) Heat transfer from the arc to bath



(d) Cumulative heat transfer

Fig. 7 Characteristics accompanied by the change due to arc current

4. 결 론

직류 전기아크로의 대상으로 플라즈마 특성을 해석하기 위하여 2차원 축대칭의 정상상태 수치해석을 수행하였다. 전류세기가 36KA, 아크길이가 0.25m 인 중간 규모의 전기아크로를 기준화염으로 정하여 전류세기 및 아크길이를 변화시키면서 그 영향을 비교하였다. 이상의 해석결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 직류 전기아크로에서 발생하는 플라즈마의 최대 온도와 최대 속도는 아크길이가 짧을수록 전류세기가 클수록 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 이때 최대온도가 발생하는 지점은 음극부이다.

(2) 전류세기를 36KA로 고정 시킨 후 아크 길이에 따른 플라즈마 특성은 아크길이가 짧을수록 전류밀도, 온도, 전단력, 총열유속의 최대값은 증가하였다. 또한 반경 6.25cm를 기준으로 온도 이외의 나머지 특성값들이 역전되었다. 즉, 여기를 기준으로 내부에서는 아크길이가 짧을수록 높은 특성값을 나타내지만, 외부에서는 아크길이가 길수록 높은 특성값을 나타내었다.

(3) 전류세기가 고정된 상태에서 아크길이가 길어질수록 bath 표면으로 전달되는 대류·복사·전자소멸·톰슨효과에 따른 누적 열전달량은 증가한다.

(4) 아크길이 0.25m로 고정시키고 전류세기의 변화에 따른 플라즈마 특성은 단순히 인가전류의 세기에 따라 플라즈마 특성값들은 비례하여 증가하였다.

(5) 아크길이를 고정시키고 전류세기를 변화시키면 전류세기가 증가할수록 bath 표면으로 유입되는 누적 열전달량은 증가한다.

참고문헌

- [1] J. Mckelliget and J. Szekeky, 5th Arc furnace meeting, Budapest, Hungary, 1985
- [2] J. Szekeky, J. Mckelliget and M. Choudhary, "Heat-Transfer fluid flow and bath circulation in electric arc furnaces and DC plasma furnaces", Ironmaking and Steelmaking, Vol. 10, No.4, pp. 169~179,1983
- [3] B. Liu, T.Zhang and D. T. Gavne, "Computational analysis of the influence of process parameters on the flow field of a plasma jet", Surface and Coating Technology, 132, pp. 202~216, 2000
- [4] M. Capitelli, G. Colonna, C. Gorse and A. D'Angola, "Transport properties of high temperature air in local thermodynamic equilibrium", Eur. Phys. J. D 11, pp. 279~289, 2000
- [5] 이동은, 김상준, "플라즈마 화염에서의 열전달 현상 해석", RIST 연구논문 제 16 권, 제 3 호, pp. 303~310, 2002