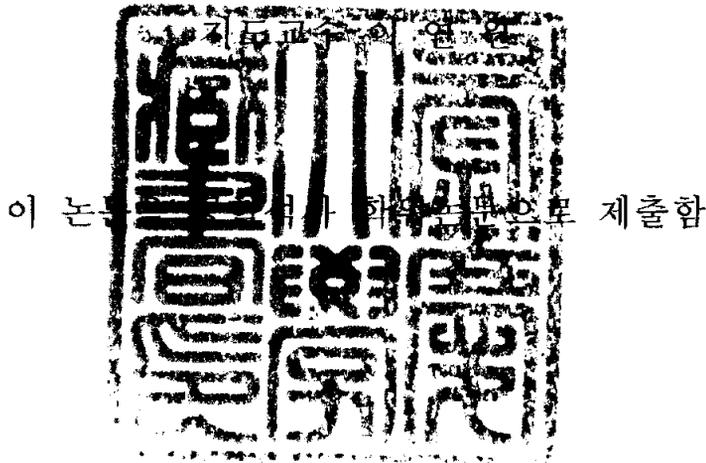


공학석사학위논문

# 전기 아크로에서의 열전달 특성에 관한 수치해석



2004년 2월

부경대학교 대학원

기계공학부

한병윤

# 한병윤의 공학석사 학위논문을 인준함

2003 년 12 월 일

주 심 공학박사 김 남 식



위 원 공학박사 권 오 봉



위 원 공학박사 이 연 원



# 목 차

Abstract

Nomenclature

## 1. 서론

## 2. 전기아크로 모델링

2-1 가정	-----	4
2-2 계산 영역 및 격자	-----	5
2-3 지배 방정식	-----	6
2-3-1 전자기장 계산	-----	11
2-3-2 음극부 열생성항	-----	12
2-3-3 양극부 열소실항	-----	13
2-4 경계조건 및 열물성치	-----	14
2-5 교류 아크 모델링	-----	17

## 3. 수치해석 결과

3-1 수치 모델의 검증	-----	21
3-2 계산 결과 및 토의	-----	23
3-2-1 아크길이 변화에 따른 특성	-----	25
3-2-2 전류세기 변화에 따른 특성	-----	29
3-2-3 각 모델별 누적 열유속 비교	-----	32
3-2-4 전류 타입(교류)에 따른 특성	-----	34

## 4. 결 론 ----- 45

참고문헌 ----- 46

# **Numerical Analysis on Plasma Characteristics of a Electric Arc Furnace**

**Byoung-Yoon Han**

Department of Mechanical Engineering, Graduate School  
Pukyong National University

## **Abstract**

As changing different current density and arc lengths which are the control variable of Electric Arc Furnace, first we examined the heat flux from the arc to the anode and the shear stress at the anode and analyzed the best efficiency model which is higher cumulative heat flux for any others. Second we compared DC arc with AC. Finally as a results, we will bring forth useful data which are the design of the Electric Arc Furnace.

So as to solve this problem, we have used the magnetic-hydro dynamics equation in order to couple the electrical fluid with the fluid flow, Maxwell's equation, and the MHD approximation. Basically, the fluid flow of arc is turbulent so we have used the two-equation model k-epsilon turbulent model which is the most widely used and validated turbulence model. For the behavior of near wall flow, we employed the standard wall function and for the convective term, we used the up-wind scheme and for the pressure-velocity linkage, we used the PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) algorithm.

So, we solved and predicted heat transfer and shear stress which are needed to apply to initial conditions for inner bath thermo-fluid flow for different model predicted the cumulative heat flux into the steel bath.

Finally, the model predictions show the cumulative heat flux is higher as the arc length is increased and the current is increased

## Nomenclature

$B_\theta$ :	Magnetic flux density
$C_D$ :	Dissipation constant for $K-\epsilon$ turbulence model
$C_P$ :	Average specific heat of plasma
$C_1$ :	Constant of $K-\epsilon$ model
$C_2$ :	Constant of $K-\epsilon$ model
$e$ :	Electron charge
$I$ :	Arc current
$J_r$ :	Radial current density in plasma
$J_z$ :	Axial current density in plasma
$k$ :	Boltzmann constant
$K$ :	Turbulent kinetic energy
$P$ :	Pressure in plasma
$R$ :	Conducting radius arc
$R_c$ :	Cathode spot radius
$S_R$ :	Radiation loss per unit volume from plasma
$v$ :	Velocity vector
$k$ :	Thermal conductivity
$k_{eff}$ :	Effective thermal conductivity
$\mu_{eff}$ :	Effective viscosity

# 1 서론

플라스마(Plasma)란 고온에서 음전하를 가진 전자와 양전하를 띤 이온으로 분리된 기체상태로서 전하분리도가 상당히 높으면서도 전체적으로는 음과 양의 전하수가 같아서 중성을 띤 기체를 말하며, 온도를 차차 높이며 거의 모든 물체가 고체로부터 액체 그리고 기체 상태로 변화하며, 수만 °C에서 기체는 전자와 원자핵으로 분리되어 플라스마 상태가 된다. 이런 플라스마 상태에서 자기장 속의 플라스마에 전극으로부터 강한 전류를 자기력선에 수직으로 통과시키며 자기장과 전류 상호작용으로 생긴 힘을 이용하는 것이 플라스마 이용 기술의 기본적인 내용이다. 이런 플라스마의 전기적 성질을 이용한 전자기유체역학(MHD)적 발전, 우주 장거리 여행용 로켓의 이온엔진 및 핵융합 연구 등을 위해서 연구가 진행되고 있다.

전기로(Electric Furnace)에서의 발열방식에 따라 저항로, 아크로, 유도로로 나뉘어 지고 일반적으로 가장 많이 사용하는 것은 직접적으로 금속 정제를 할 수 있는 아크로이다. 이에 널리 제강용(製鋼用)으로 많이 사용되는 전기 아크로(Electric Arc Furnace)는 전극과 용융할 대상 금속 사이에 아크의 형태로 전류를 흘려서 가열하여 그 사이에 발생하는 플라스마로 금속을 녹이는 장치이다. 이를 유동장 및 온도장 등을 수치 묘사한 선행 연구자로서 J. Szekely, J. W. Mckelliget (1983)는 직류 전기 아크로에서 주요 열물성치를 상수라 가정하여 수치해석 하였고, B. Liu, T. Zhang (2000) 플라스마 제트의 유동장만을 고려하여 수치 해석을 수행하였고, D. E. Lee, S. J. Kim (2002)은 직류 전기 아크로의 열전달 현상에 대한 수치해석만을 수행하였다.

본 논문의 연구 대상으로 채택한 전기 아크로<sup>1,6)</sup>는 산업체에서 적용되는 중간정도 규모이며, 제어변수인 전류세기와 아크길이에 따라 변하는 플라스마의 열유동 특성을 파악하기 위해 우선 전류세기 I를

32~44kA까지 4kA 간격으로 고정시키고 이때 아크길이(Arc Length)를 0.15, 0.20, 0.25, 0.30m로 0.05m 간격씩 변화시켰고, 또 다른 제어 변수인 아크길이를 각각 0.15m~0.30m로 고정시킨후 전류세기를 32kA~44kA로 변화를 주어 계산하여 변화된 제어변수에 대한 온도장, 속도장의 유동 패턴 및 Steel bath 표면에서의 전단응력과 열유속 및 Steel Bath로 유입되는 총 열량인 누적 열유속 등을 분석하여 가장 효율이 좋은 모델을 선정하고, 이를 교류 전류 일때와 비교하여 최종적으로 최적의 아크 길이, 전류 세기 및 전류 흐름의 타입을 선정하여 전기로 설계에 있어 기초 자료를 제시하고자 한다.



Fig. 1.1 Electric Arc Furnace

## 2 전기 아크로 모델링

전자기 유체역학은 유체가 자기력선을 가로지르는 방향으로 운동하면서 전류가 흐리면 새로운 자기장이 발생하고, 또 자기장 속에 전류가 흐르면 유체에 힘이 작용하여 운동상태를 바꾼다. 이러한 유체 운동과 자기장의 상호작용은 유체역학의 기초방정식과 전자기학의 맥스웰방정식에 의해 설명된다. 유체 유동장과 자기장 사이의 결합은 두 가지 기본적인 효과의 기초에서 이해되어 질 수 있다. 첫 번째로 자기장에서 전도되어지는 물체의 운동에 의한 전기밀도의 유도, 전기 밀도와 자기밀도의 상호작용의 결과로써 로렌츠의 영향이다. 유동장과 전자기장 사이의 상호작용 연구에서, 유도에 의한 전류밀도  $\vec{j}$  를 아는 것이 매우 중요하다. 일반적으로, 두가지 접근들은 전류밀도를 평가하기 위해 사용되어 질 수 있다. 첫 번째는 자기 유도 방정식의 해를 통해서이고, 두 번째는 electric potential 방정식을 푸는 방법이며, 세 번째는 근사식과 경험식을 이용하는 방법이다.

첫 번째 자기 유도 방법으로, 자기 유도 방정식은 음법칙과 맥스웰 방정식으로부터 유도되어 진다. 자기 유도 방정식은 유동장과 자기장 사이의 결합을 제공한다. 일반적으로, 전류밀도를 정의한 음법칙과 음법칙과 맥스웰 방정식으로부터, 자기 유도 방정식은 유도되어 질 수 있다. 두 번째 electric potential 방정식을 풀고, 음법칙을 이용하여 전류 밀도를 구하는 방법이다.

세 번째 방법으로 본 연구에서는 전자기유체 방정식의 근사를 이용하여  $r, z$  방향의 전류밀도를 구하였고, 자기 벡터 포텐셜과 전기장은  $\theta$ 방향의 성분만 고려하여 자기밀도를 구하였다.

## 2-1 가 정

전기 아크로의 아크에서 Steel Bath로의 열전달 현상을 수치적으로 해석하기 위해서 다음과 같은 가정들을 사용하였다.

- (1) 플라즈마는 전기전도성을 띄는 공기라 가정하였고, 플라즈마의 열물성치는 온도의 함수이다.
- (2) 플라즈마는 매우 빠른 속도로 축을 중심으로 발생하므로 플라즈마의 특성들이 방향에 의존하지 않는다는 축대칭 가정과 2차원 정상 상태로 가정이다.
- (3) 플라즈마 생성시 전자와 이온간의 활발한 충돌에 의해 플라즈마 불꽃 대부분 지역에서는 열적 평형을 이루는 국부열평형(Local Thermodynamic Equilibrium, LTE) 상태에 놓여있다.
- (4) Bath 표면인 양극에서 아크제트의 충돌에 의한 자유표면의 변화는 무시한다.

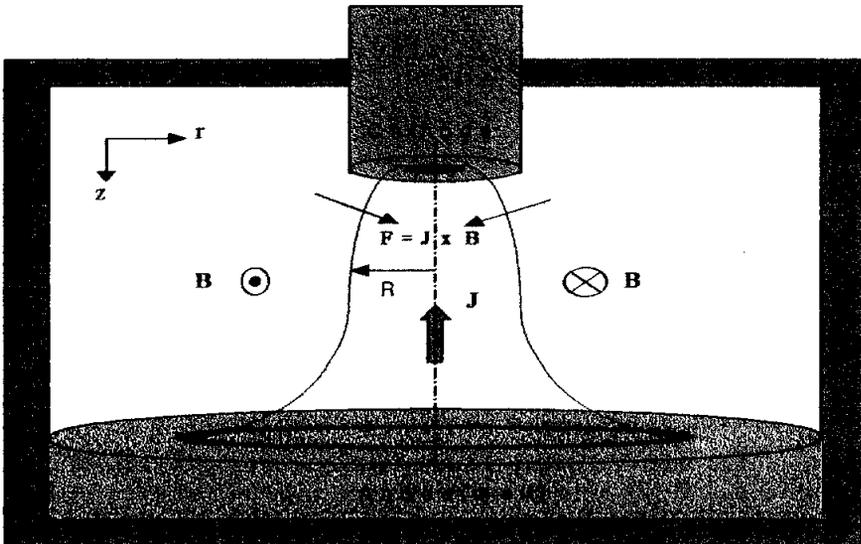


Fig. 2.1 Schematic diagram of the DC electric arc furnace model

## 2-2 계산 영역 및 계산 격자

계산영역을 크게 세 부분으로 구분하였다. 음극 표면에서 축방향( $z$ )으로 1mm까지를 음극부(cathode region), bath 표면에서 높이 1mm 이내를 양극부(anode region), 그 이외의 영역을 공기부로 지정하였다. 음극의 크기는 축방향( $z$ ) 및 반경방향( $r$ )으로 각각 0.05m × 0.08m이며 반경방향 계산영역은 음극부 끝을 기준으로 0.42m까지 확장하여 총 반경방향( $r$ )의 길이는 0.5m로 고정하였다. 축방향으로의 아크길이(arc length)는 0.15 ~ 0.30m의 범위내에서 각 0.05m씩 변화시켜 격자를 구성하였다. 각 아크 길이에 대한 계산 격자는 0.15cm 일때 12315개, 0.20cm 일때 15965개, 0.25cm 19615개, 0.30cm 일때 23265개 이다. 그리고 플라즈마 발생형태는 음극부와 양극부사이에 국부적으로 고온과 고속의 아크젯트가 형성되므로 발생 부위의 계산을 정확하게 하기 위해서는 플라즈마 발생부위에 격자의 배치를 집중시켜 계산을 수행하였다. Fig. 2.2에서는 전기 아크로의 수치계산 영역을 나타낸다.

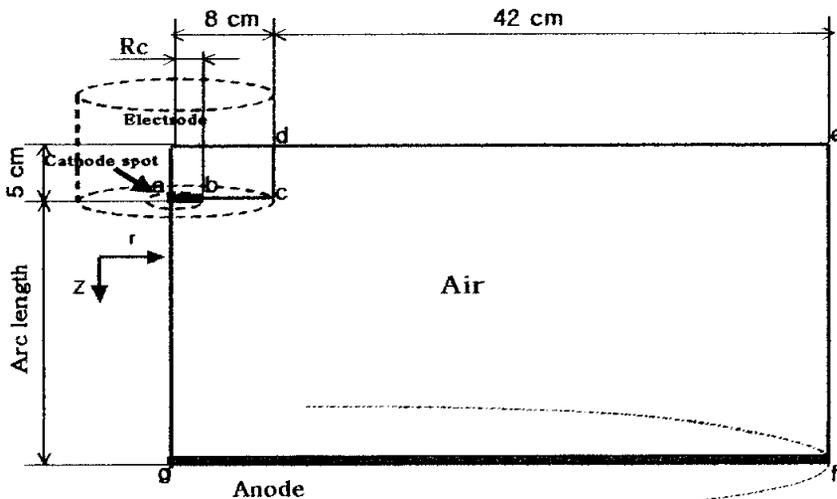


Fig. 2.2 Calculation domain for DC arc model

## 2-3 지배방정식

플라즈마의 온도 및 속도와 전류밀도 등의 특성분포를 계산하기 위해 본 논문에서의 전기 아크로의 플라즈마 수치해석은 플라즈마도 전기전도성을 띠는 하나의 유체로 보는 Single fluid 이론과 자기유체역학적(Magneto-Hydro Dynamics, MHD)이론 방정식 및 근사식 그리고 난류 현상을 모사하기 위해 2방정식 난류모델인 K- $\epsilon$  방정식, 질량, 운동량, 에너지보존 방정식을 유한 체적법을 사용하여 이산화하고 대류항에 대해서는 공간이산화는 상류도식(Upwind scheme)을 이용하였으며 압력과 속도 보정은 PISO(The Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 알고리즘을 사용하였다. 난류 유동에서 벽부근에서 급격한 속도구배를 정확하게 구하기 위해서는 많은 격자가 필요하고, 계산시간이 과다하게 소요되므로 벽부근에는 standard wall function을 사용하였다. 축대칭인 원통형 좌표계에서 지배방정식들은 다음과 같다.

### (1) 연속방정식

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w)}{\partial r} = 0 \quad (2.3.1)$$

여기서  $\rho$ 는 플라즈마의 밀도,  $v, w$ 는 각각 축방향 및 반경방향의 플라즈마 속도성분을 나타낸다.

(2) 운동량 방정식

- 축(z)방향 운동량 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w)}{\partial r} = \\ & - \frac{\partial P}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu_{eff} \left( \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + J_r B_\theta \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

- 반경(r)방향 운동량 보존 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w^2)}{\partial r} = \\ & - \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right] + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu_{eff} \left( \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right] - \mu_{eff} \frac{2v}{r^2} - J_z B_\theta \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

여기서  $P$  는 압력,  $\mu_{eff}$  는 유효점성계수를 나타내고,  $J_r$  과  $J_z$  은 반경방향 및 축방향 전류밀도,  $B_\theta$ 는 접선방향으로의 자기유속밀도이며  $J_r B_\theta$  ,  $J_z B_\theta$  는 각각 계산영역내 전류밀도 및 유도자기장에 의해 발생하는 Lorentz힘의 축방향 및 반경방향 성분을 나타낸다. Lorentz 힘이란 하전입자가 자기장 속에서 운동을 할 때 받는 힘을 말하며, 힘의 방향은 자속과 속도 방향과 수직으로 작용한다.

(3) 에너지 보존방정식

$$\frac{\partial(\rho v h)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w h)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{eff}}{k} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_{eff}}{k} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \left( \frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma_\epsilon} \right) - \frac{5}{2} \frac{k_b}{e} \left( \frac{J_r}{C_p} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{J_z}{C_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.3.4)$$

여기서  $h$ 는 엔탈피,  $\sigma_\epsilon$ 는 전기전도도를 나타낸다. 에너지 보존 방정식에는 두개의 대류항과 Joule heating항, Thompson effect항으로 구성되어 있다. Joule heating 은 Steel bath 표면의 양극과 그래파이트 성분의 음극 사이에 전류를 흘렸을 때 발생하는 저항열이며, Thompson effect 는 각각의 극에 온도차가 있을 때, 이것에 전류를 흘리면, 부분적으로 전자(電子)의 운동에너지가 다르기 때문에 온도가 변화하는 곳에서 열이 발생하거나 흡수가 일어나는 현상을 말한다.

(4) 난류 보존 방정식

난류점성계수  $\mu_t$  는 점도와 같은 물성값이 아니고 난류운동의 양상이나 유동의 이력에 따라 변하는 값이다. 이 난류점성계수는 현재까지의 난류에 관한 많은 계통적인 실험이나 고찰로부터 난류운동의 특성길이 와 특성속도에 의해 결정되는 값이라고 알려져 있다. 2-방정식 모델은 난류운동을 지배하는 속도 스케일과 길이 스케일 양자를 수송방정식으로 주도록 하는 것이다.

여기서는 공학적으로 널리 보급하여 사용하고 있는 2방정식 난류 모델인 K- $\epsilon$  난류 모델을 채용하여 난류 점성계수를 결정하며, K- $\epsilon$  난류 모델은 난류 에너지 K로부터 특성속도, 점성소산의 크기  $\epsilon$ 를

이용하여 간접적으로 특성길이를 구하는 모델이다.

- 난류 점성계수

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (2.3.5)$$

- 난류 운동 에너지  $K$ 의 수송방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v K)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w K)}{\partial r} = \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_K} \frac{\partial K}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_K} \frac{\partial K}{\partial r} \right) + G - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (2.3.6)$$

여기서 난류 운동 에너지  $K$ 는 난류운동에 대한 강도를 나타낸다.

- 난류 운동에너지 소산율  $\epsilon$ 의 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} (\rho v \epsilon) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r w \epsilon) = \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \end{aligned} \quad (2.3.7)$$

여기서  $\epsilon$ 는 난류 운동에너지 소산율을 나타내며,  $G$ 는 난류점성계수와 점성소산의 곱으로 다음과 같이 주어진다.

$$G = \mu_{eff} \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{w}{r} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (2.3.8)$$

식(2.3.5~2.3.8)의 난류 점성계수, 난류 운동에너지 및 난류 운동에너지 소산율에 쓰인  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  난류 상수이다. 이 상수의 값은 격자 난류 및 채널 난류 등의 기초 실험 데이터에 의거하여 추천되고 있는 값을 사용하였다.

Table 2.1 Constants used in the turbulence equations

$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$C_1$	$C_2$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.87

### 2-3-1 전자기장 계산

Fig. 2.1의 아크기둥 반경  $R$ 과 Fig. 2.2에서 A-B구간에 해당하는 음극점 반경(cathode spot radius)  $R_c$  는 다음과 같은 실험식들을 사용하여 결정하였다<sup>16)</sup>. 여기서  $I$ 는 인가된 전류량이며  $J_c$ 은 음극점에서의 평균 전류밀도(약  $4.4 \text{ kA/cm}^2$ )이다.

$$R_c = \sqrt{\frac{I}{\pi J_c}} \quad (2.3.9)$$

$$R = R_c \left( 1 + \sqrt{\frac{z}{R_c}} \right) \quad (2.3.10)$$

축방향 전류밀도  $J_z$ 는 아크의 반경방향으로 포물선 형태를 갖는다고 가정하면,  $J_z = ar^2 + br + c$ 의 형태로 표현할 수 있으며 다음의 식으로부터 계산이 가능하다.

$$I = \int_0^R 2\pi r J_z dr \quad (2.3.11)$$

$r=R$ 일때  $J_z = 0$ 이고  $r=0$ 에서  $\frac{\partial J_z}{\partial r} = 0$ 인 조건에서  $J_z = a(r^2 - R^2)$ 이 되는데 이를 식 (2.3.11)에 대입하면 최종적으로 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} J_z &= \frac{2I}{\pi R^4} (R^2 - r^2) && \text{일때 } r \leq R \\ &= 0 && \text{일때 } r > R \end{aligned} \quad (2.3.12)$$

반경방향 전류밀도  $J_r$ 은 MHD 근사식인  $\nabla \cdot J = 0$ 인 조건으로부터 식 (2.3.13)과 같이 결정되며 접선방향 자기유속밀도 식 (2.3.14)의  $B_\theta$ 는 맥스웰 방정식  $\nabla \times H = \nabla \times (B/\mu) = J$ 에서  $B_r = B_z = 0$ 인 경우에  $\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rB_\theta) = J\mu$ 식으로부터 유도할 수 있다. 여기서  $\mu$ 는 투자율 (magnetic permeability)로 물질의 자기적 성질을 나타내는 양을 말한다.

$$J_r = \frac{I}{\pi} \left[ \frac{r}{R^3} - \frac{r^3}{R^5} \right] \sqrt{\frac{R_c}{z}} \quad \text{일때 } r \leq R$$

$$= 0 \quad \text{일때 } r > R \quad (2.3.13)$$

$$B_\theta = \frac{\mu I}{\pi} \left[ \frac{r}{R^2} - \frac{r^3}{2R^4} \right] \quad \text{일때 } r \leq R$$

$$= \frac{\mu I}{2\mu r} \quad \text{일때 } r > R \quad (2.3.14)$$

### 2-3-2 음극부 열생성

Fig. 2.2의 음극부 A~C구간에 플라즈마를 이온화시키기 위해 필요한 열에너지를 공급해주어야 하는데 본 논문에서는  $r \leq R_c$ 인 영역에서 Mckeliget과 Szekely<sup>2)</sup>가 제안한 수치적 생성항을 표현을 사용하였다.

$$Q_c = |J_c| \frac{5}{2} \frac{k_b (T_g - T_{cat})}{e} \quad (2.3.15)$$

여기에서  $T_g$ 는 음극부 내의 온도를 나타내고  $T_{cat}$ 는 음극의 표면온

도를 나타내며 기존 연구 결과로부터  $T_{cat}$ 는 4000K을 사용했다. 그리고  $e$ 는 전하량이고  $k_b$ 는 볼쯔만 상수를 나타낸다.

### 2-3-3 양극부 열손실

플라즈마 생성시 아크로의 양극(Bath 표면) 근처에서는 대류 및 복사, Thompson effect 그리고 전자가 bath내부로 소멸 될 때의 열손실 등이 주요 열에너지 손실 메커니즘으로 판단된다.

여기서는 대류 및 Thompson effect, 전자의 소멸에 따른 열손실 표현식만을 정리하였다. 복사는 FLUNET software 에 내장되어 있는 복사모델중 구분종좌표법인 DOM(Discrete Ordinate Method) 모델을 사용하였고, Bath 표면에서의 방사율은 0.8로 하였다<sup>16)</sup>.

$$Q_{conv} = \frac{0.915}{k_w} \left( \frac{\rho_b \mu_b}{\rho_w \mu_w} \right)^{0.4} \left( \frac{\rho_w \mu_w v_b}{r} \right)^{0.5} c_p (T_b - T_w) \quad (2.3.16)$$

$$Q_{Thompson} = \frac{5J_A}{2e} k_b (T_g - T_{Anode}) \quad (2.3.17)$$

$$Q_A = J_A (V_A + q_A) \quad (2.3.18)$$

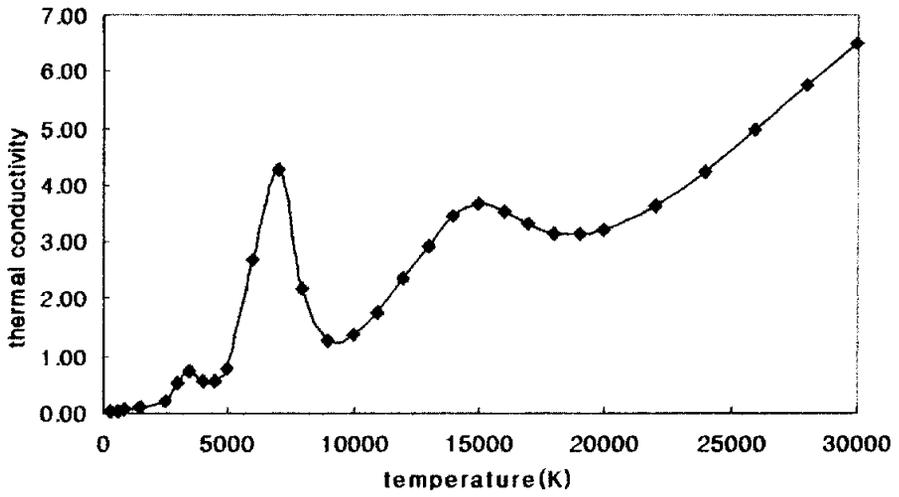
식 (2.3.16)에서 첨자  $w$ 는 bath 표면을 나타내고  $b$ 는 양극부 내부 값을 나타낸다. bath의 열물성치인 밀도( $\rho_w$ ), 열전도도( $k_w$ ), 점도( $\mu_w$ )는 각각  $7800 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.72 \text{ W/m-K}$ ,  $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m-s}$ 인 상수값을 적용하였다. 식 (2.3.17)에서  $J_A$ 는 양극에서의 전류밀도이고  $T_g$ 는 양극부 내부 온도,  $T_{Anode}$ 는 bath 표면온도이다. 전자 소멸에 따른 열손실  $Q_A$ 에서  $V_A$ ,  $q_A$ 는 각각 4V인 값을 갖는다고 가정하였다.

## 2-4 경계조건 및 열물성치

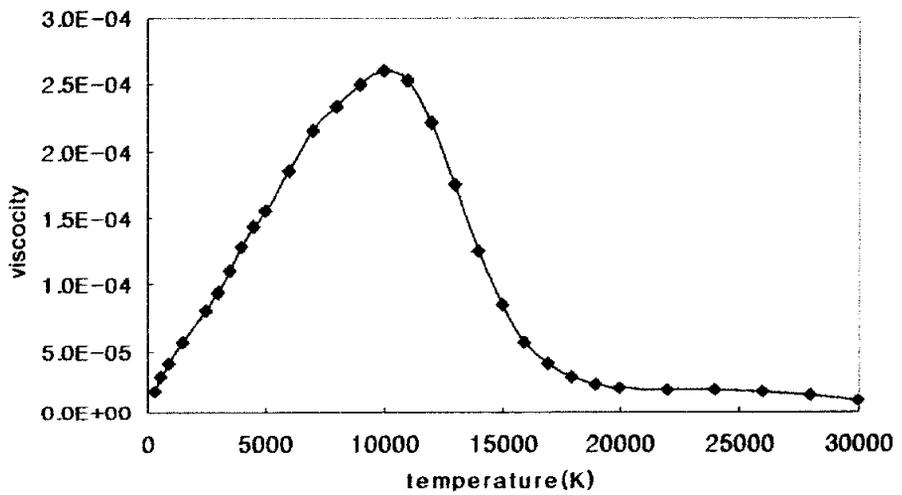
Fig. 2.2에서 음극부 A~C, C~D와 양극부 F~G에서의 벽면 경계 조건은 점성에 의한 축방향 및 반경방향 속도가 정지가 되는 No-slip 조건을 적용하였다. 음극점 A~B 경계벽면 온도는 4000K로 유지되고 음극표면에서 축방향(z)으로 가장 인접한 cell에 열생성항인 식(2.3.15)을 적용하였다.

음극부 B~C와 C~D에서 경계벽면 온도는 1800K으로 유지하였다. 또한 D~E와 E~F 구간은 대기압 상태의 자유 유출입 조건과 엔탈피 구배를 0으로 주었다. 양극부(bath 표면) F~G구간의 경계표면 온도는 1800K으로 유지되고 양극부(bath 표면)에서 축방향(z)으로 가장 인접한 cell에 열소실항인 식(2.3.16~18)을 적용하였다. G~A구간은 대칭축으로 Neumann 조건을 사용하였다. 그리고 플라즈마에 적용한 열물성치는 M. Capielli, & G. Colonna<sup>5)</sup>이 대기압의 공기를 대상으로 50 ~ 100,000K의 온도 범위 내에서 이론적으로 계산한 비열, 점도, 열전도도 및 전기전도도 값의 Fitting Equation에서 계수를 수정하여 사용하였다. 또한 온도에 따른 공기의 밀도변화는 이상가스 법칙으로부터 계산하였다.

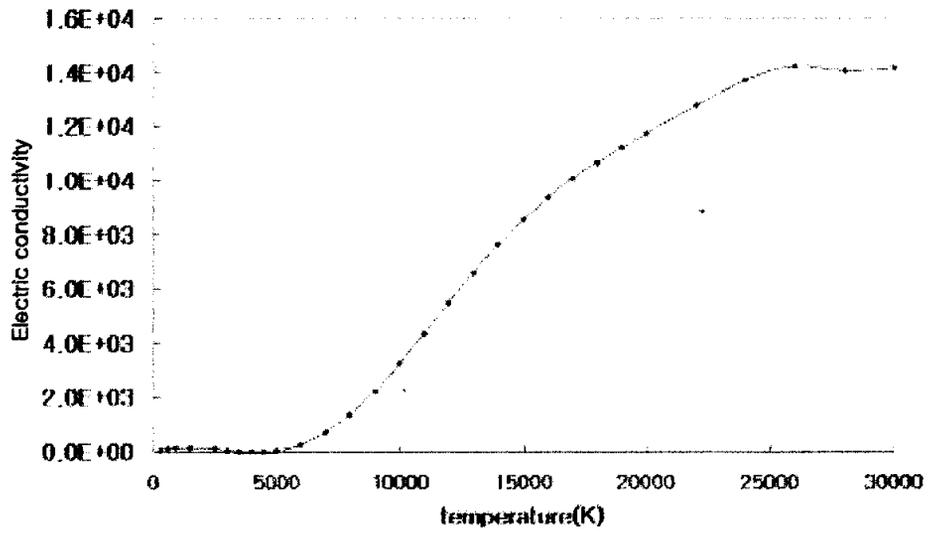
Fig. 2.2에서 경계면 A~G의 경계면에 적용되는 조건을 Table 2.3에 요약하였다. Fig. 2.3은 논 연구에 사용된 열물성치를 나타내었다.



(a) Thermal conductivity



(b) Viscosity



(c) Electric conductivity

Fig 2. 3 Plasma properties<sup>5)</sup>

Table 2.2 Boundary conditions

Boundary	v	w	h
A-B	0m/s	0m/s	T=4000K Q=eq(2.4.15)
B-C	0m/s	0m/s	T=1800K
C-D	0m/s	0m/s	T=1800K
D-E	P=1atm		$\frac{\partial h}{\partial z} = 0$
E-F	P=1atm		$\frac{\partial h}{\partial r} = 0$
F-G	0m/s	0m/s	T=1800K Q=eq(2.4.16~18)
G-A	0m/s	$\frac{\partial w}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial h}{\partial z} = 0$

## 2-5 교류 아크 모델링

교류현상은 전류 및 전압의 흐름의 방향이 시간에 따라 주기적으로 변화하며, 일반적인 교류는 사인파의 파형을 가지며, 한주기에 대해서 비정상 상태로 수치 해석을 수행하였다. 각각 순전류 및 역전류로 나눠 계산을 수행하였고, 1/4 주기에 해당하는 시간 1/240 초이며, time step은 4.6296e-5 초로 하여 비정상 수치계산의 안정도를 위해서, CFL(Courant Friedrichs Lewy) conditions 을 만족하도록 계산을 수행하였다

### (1) 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w)}{\partial r} + \frac{\partial \rho v}{\partial z} = 0 \quad (2.5.1)$$

### (2) 운동량 방정식

- 축(z)방향 운동량 방정식

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu_{eff} \left( \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + J_z B_\theta \quad (2.5.2)$$

- 반경(r)방향 운동량 방정식

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w^2)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right] + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial r} \right) - \mu_{eff} \frac{2v}{r^2} - J_z B_\theta \quad (2.5.3)$$

(3) 에너지 보존방정식

$$\frac{\partial(\rho v h)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w h)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{eff}}{k} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_{eff}}{k} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma_e} - \frac{5 k_b}{2 e} \left( \frac{J_r}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{J_z}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.5.4)$$

(4) 난류 보존 방정식

- 난류 운동 에너지 K의 수송방정식

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v k)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w k)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (2.5.5)$$

- 난류 운동 에너지 소산을  $\varepsilon$ 의 방정식

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w \varepsilon)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \quad (2.5.6)$$

### 2-5-1 전자기장 계산

인가 전류  $I$ 는 교류 일때, 아래 식 (2.5.7) 및 (2.5.8)처럼 표현된다.

$$I_{AC} = \sqrt{2} \times I_{DC} \quad (2.5.7)$$

$$I_{AC} = \sqrt{2}I_{DC}\sin(\omega t + \phi) = \sqrt{2}I_{DC}\sin(2\pi f t + \phi) \quad (2.5.8)$$

여기서,  $I_{DC}$  는 실효전류(직류일때 전류세기)이며,  $f$ 는 교류주파수 (60Hz)를 나타내며,  $t$ 는 시간이며,  $\phi$ 는 위상을 나타낸다. 그러므로 그 라파이트 성분의 음극점 및 음극 반경은 다음과 같이 시간에 따라 변화한다. 그러므로 전류밀도 및 이에 구해서는 자속밀도 교류 전류가 들어감에 따라 시간에 대한 함수가 된다.

- 음극점 반경

$$R_c = \sqrt{\frac{I_{AC}}{\pi J_c}} \quad (2.5.9)$$

- z 방향 및 r 방향 전류 밀도

$$J_z = \frac{2I_{AC}}{\pi r^4} (R^2 - r^2) \quad (2.5.10)$$

$$J_r = \frac{I_{AC}}{\pi} \left[ \frac{r}{R^3} - \frac{r^3}{R^5} \right] \sqrt{\frac{R_c}{z}} \quad (2.5.11)$$

-  $\theta$  방향 자속밀도

$$B_\theta = \frac{\mu I_{AC}}{\pi} \left[ \frac{r}{R^2} - \frac{r^3}{2R^4} \right] \quad (2.5.12)$$

그러므로 로렌츠 힘 역시 시간에 따라 변하게 되며, r방향 및 z축 방에 운동량 방정식 및 에너지 보존 방정식에 시간에 따라 변하도록 소스로 추가하였다.

본 연구에서 계산된 교류사이클은 아래의 Fig. 2.4 와 같다.

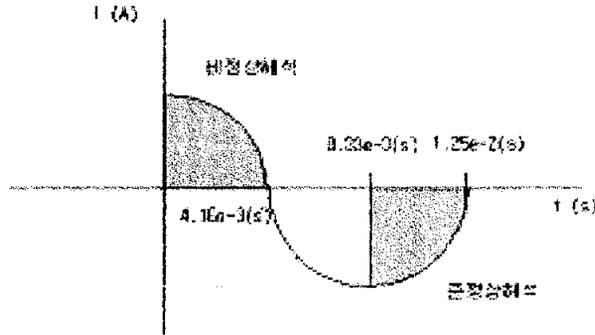


Fig. 2.4 period of alternating current

수치 해석의 범위는 계산상 그림과 같이 사이클에서 수행하였다. 순전류(+) 부분의 계산의 경우에는 기본적인 직류 아크모델의 가정을 따랐으며, 역전류(-) 일 경우에는 기본적으로 DC의 경계조건을 원용하였다. 다만 역전류의 경우 전자의 방출이 순전류(+)의 경우처럼 Cathode spot에서 집중적으로 방출되지 않고 오히려 bath의 slag물성 및 표면의 기하학적 모양을 고려할 때 넓은 영역에서 방출되어, 양극인 graphite 전영역으로 이동할 것으로 판단된다. 따라서 plasma arc 영역을 전류의 방향이 바뀌어도 불구하고 DC 일때와 유사한 형태를 유지하되 보다 넓은 영역으로 가정할 수 있다.

### 3 수치해석 결과

#### 3-1 수치 모델의 검증

실제 크기의 직류 전기 아크로를 해석하기에 앞서서, 구성된 수치 모델의 타당성을 검증하기 위해 작은 규모의 플라즈마 화염에 대한 온도 및 속도에 대한 실험 데이터와<sup>2)</sup> 계산결과를 비교해 보았다.

실험데이터는 전류세기( $I$ ) 2.16kA, 아크길이( $L$ ) 0.075m, 음극의 크기는 축방향( $z$ ) 및 반경방향( $r$ )으로 5mm×10mm를 갖는 직류 전기아크로이며 이에 따라 수치계산 모델도 전류세기, 아크길이 음극크기를 동일하게 적용하고 반경방향으로 계산영역은 대칭축을 기준으로 0.2m로 하였다. 여기서 작은 규모의 직류아크로의 수치계산상의 최대 온도는 음극부 지점에서 24,500K으로 나타났으며 최대속도는 950m/s로 계산되었다. 그리고 양극부(bath 표면)로 내려갈수록 온도와 속도가 줄어드는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3.1과 3.2는 축방향으로의 플라즈마 온도 및 속도에 대한 실험 데이터와 수치 계산 데이터를 비교한 그래프인데 수치계산에 의한 값과 실험치가 비교적 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다.

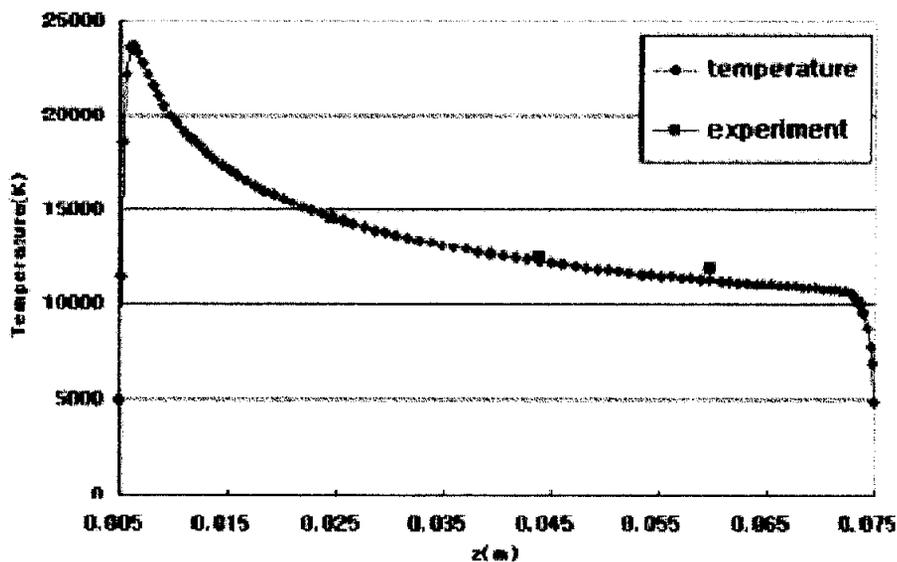


Fig. 3.1 Temperatures of plasma arc in an axial direction

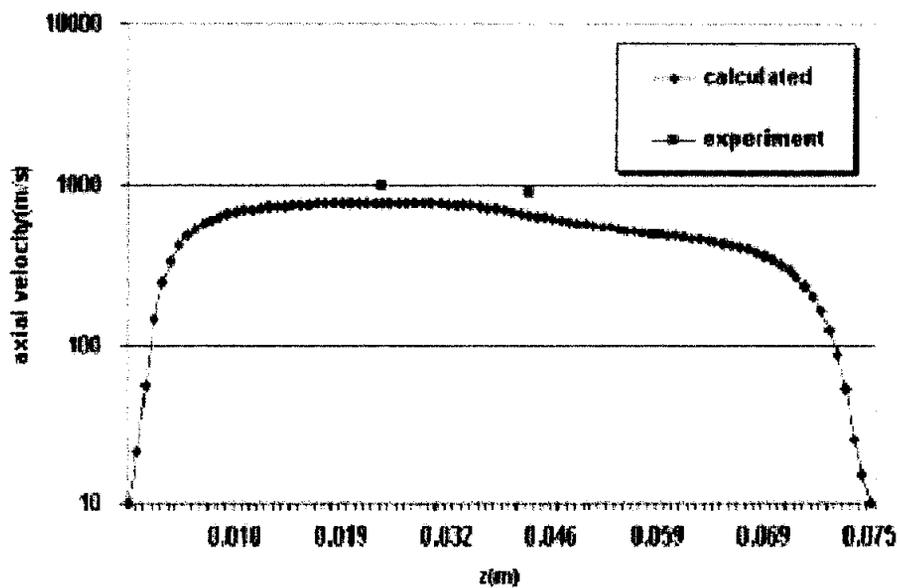


Fig. 3.2 Axial velocity of plasma arc in an axial direction

### 3-2 계산 결과 및 토의

플라즈마의 제어변수인 전류세기와 아크길이에 따라 변화되는 플라즈마의 온도와 속도의 특성 그리고, bath 표면에서의 전단응력과 열유속의 특성을 파악하기 위해 수치해석을 수행하였다.

아크길이가 고정된 상태에서 전류세기가 증가하면 온도 및 속도가 모두 증가하지만 최대온도 및 최대속도는 전류세기에 무관하게 동일하였다. 반대로 전류세기가 고정된 상태에서 아크길이가 짧아지면 steel 표면에서의 최대 속도 값은 커지고 최대 속도가 형성되는 위치는 아크길이가 길수록 반경방향으로 멀어짐을 알 수 있었다.

Fig. 3.3~3.4 는 기준 모델(전류세기 32kA, 아크길이 0.25cm)로 채택한 직류 전기 아크로 대상을 대상으로 계산한 플라즈마 화염에서의 속도벡터 및 온도장을 나타내었다. Fig. 3.3은 속도벡터로 그라파이트의 cathode 부에서 아크가 가속되어 molten-steel의 anode부에 부딪쳐 대기로 나가는 것을 알 수 있으며, Fig. 3.4는 온도장으로 음극부에서 최대온도를 가지는 것을 알 수 있다.

Table 3.1 Maximum Temperature and Velocity

모델명	최대 온도 (K)	최대 속도 (m/s)	모델명	최대 온도 (K)	최대 속도 (m/s)
15cm32kA	33895	3093	15cm40kA	34218	3345
20cm32kA	33896	3093	20cm40kA	34219	3346
25cm32kA	33897	3093	25cm40kA	34219	3346
30cm32kA	33897	3093	30cm40kA	34219	3346
15cm36kA	34076	3222	15cm44kA	34274	3429
20cm36kA	34077	3222	20cm44kA	34274	3429
25cm36kA	34077	3222	25cm44kA	34274	3429
30cm36kA	34078	3222	30cm44kA	34274	3428

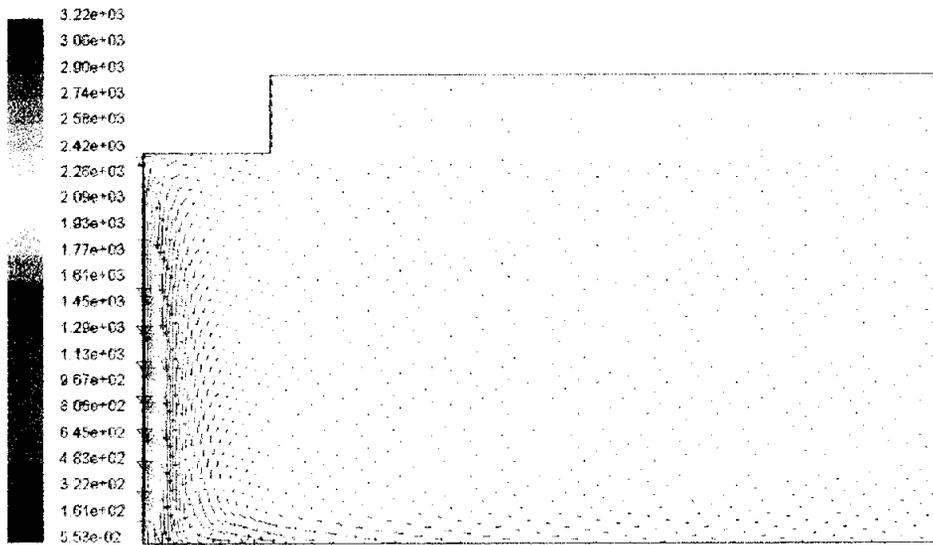


Fig. 3.3 Velocity vector in the 36kA arc current and 0.25m arc length



Fig.3. 4 Temperature contour in the 36kA arc current and 0.25m arc length

### 3-2-1 아크길이 변화에 따른 특성

인가 전류를 동일하게 설정하고, 아크 길이를 변화하여 수치 해석을 수행하였고 그 결과를 Fig. 3.5~3.8에 나타내었다. Fig 3.5는 전류 세기를 각 32kA~44kA 까지 고정을 시키고 아크 길이를 변화시켜 Steel Bath 표면에서의 아크 반경방향 속도를 나타낸다. 각 모델은 동일한 속도 분포를 나타낸다. Bath 표면 0.03~0.05m의 아크 반경 중심부까지 2차함수의 형태로 급격하게 증가하며, 그 이후로는 속도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 각각 전류를 고정시킨 모델에서 아크 반경내에서 최대 반경 속도는 아크 길이가 적을 수록 크다는 것을 알 수 있다. 아크길이 짧을수록 bath 표면에서의 반경속도 최대값은 대칭축에 가까워 진다. 이는 cathode에서 나와 대기중에서 아크반경이 축방향에 비례한다. 이때 아크길이 짧아지면 아크반경 또한 작아지고 반경방향 운동량식에서 source로 작용하는 로렌쯔힘 ( $J_z B_\theta$ )에서 축방향 전류밀도( $J_z$ )가 작아지므로, 반경방향 속도가 가장 높고, 또한 0.20, 0.25, 0.30m에 비해 플라즈마가 적게 성장한 과정에서 bath 표면에 충돌하므로 아크 길이가 짧을 수록 반경방향 속도 최대값은 축에 가까운 지점에서 발생한다.

Fig. 3.6은 반경방향 전단 응력을 나타낸다. 반경방향 전단응력은 Bath 내부 유동에 중요한 백터이며, 내부 유동을 계산하기 위해 초기 경계조건으로 부여 된다.  $\tau = \mu \frac{\partial v_r}{\partial z}$  로 계산되기 때문에 속도 분포와 동일한 분포가 됨을 알 수 있다. 따라서 반경방향 전단응력 역시 각

각 전류를 고정시킨 모델에서 아크 반경내에서 최대 반경 속도는 아크 길이가 적을수록 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 3.7은 Steel bath 표면에서의 온도 분포를 나타낸다. bath 표면에서의 온도는 아크 길이 0.15m 일 때, 반경방향 온도구배가 가장 크게 감소하고, 대칭축에서 가장 높은 온도를 나타내었다. 이는 아크 반경이 좁으므로 플라즈마와 충돌이 일어나는 부분에서 국부적으로 가장 고온이 발생한다. 그리고 아크길이 0.3m 일 때, 아크 반경이 가장 크므로, 플라즈마로부터 가장 넓은 면적으로 열량을 공급 받는다. 그리고 0.25m와 비교를 하면 최대 온도차이는 많이 나지 않았지만, 전체적으로 볼 때 약간 높음을 알 수 있다.

Fig. 3.8은 아크에서 Steel bath 내부로 전달되는 heat flux를 나타낸다. 아크 길이가 0.15m일 때 최대 열유속이 나타나지만, bath 표면에 충돌하는 아크 반경이 작으므로 국부적으로만 열유속이 높다. 이에 비해 아크길이 0.30m 일 때는 최대 열유속은 가장 적지만 bath 표면에 부딪히는 아크 범위가 크므로 열유속의 구배가 완만하게 감소하며 bath 표면 전반에 걸쳐 면적분을 하게되면 가장 높은 열을 bath로 공급한다는 것을 알 수 있다.

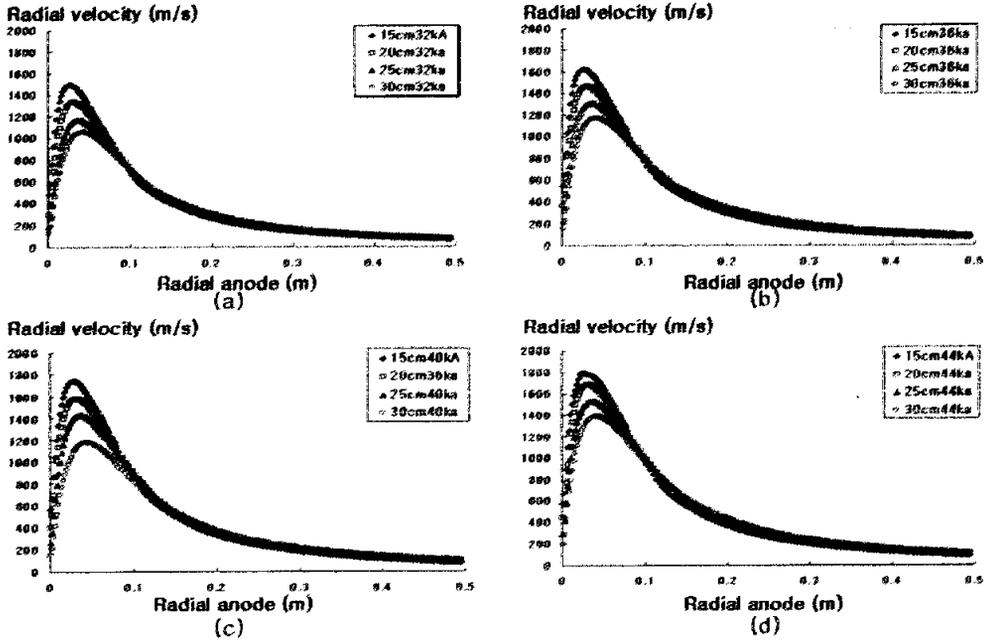


Fig. 3.5 Radial velocities at the anode

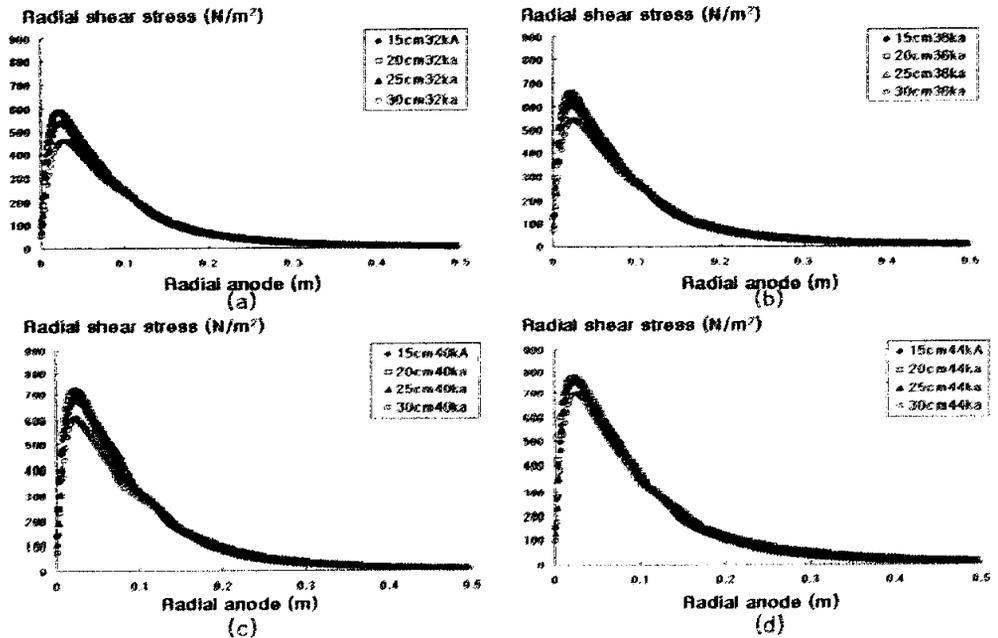


Fig. 3.6 Radial shear stresses at the anode

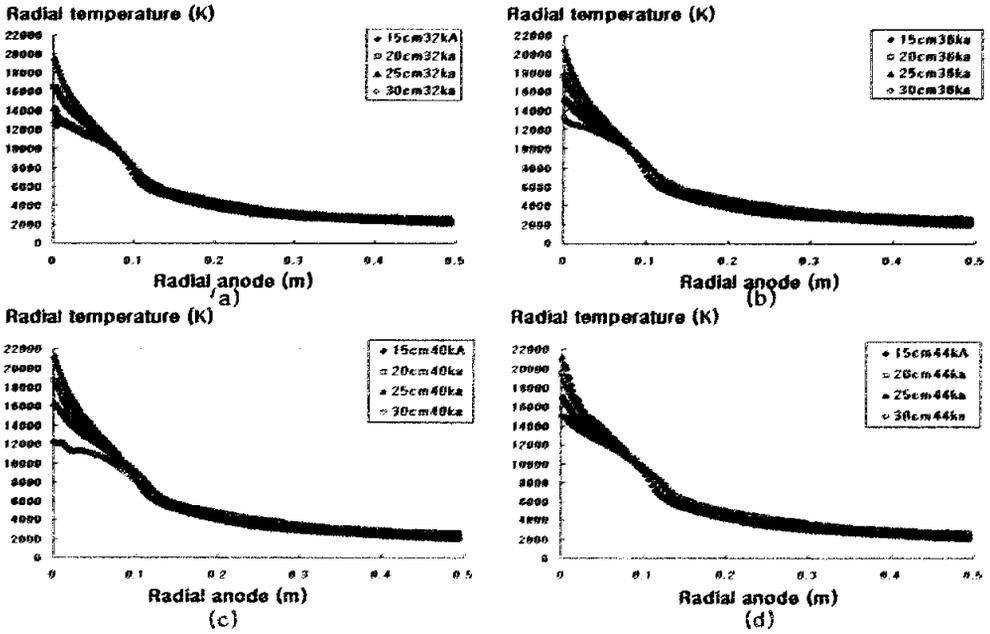


Fig. 3.7 Radial temperatures at the anode

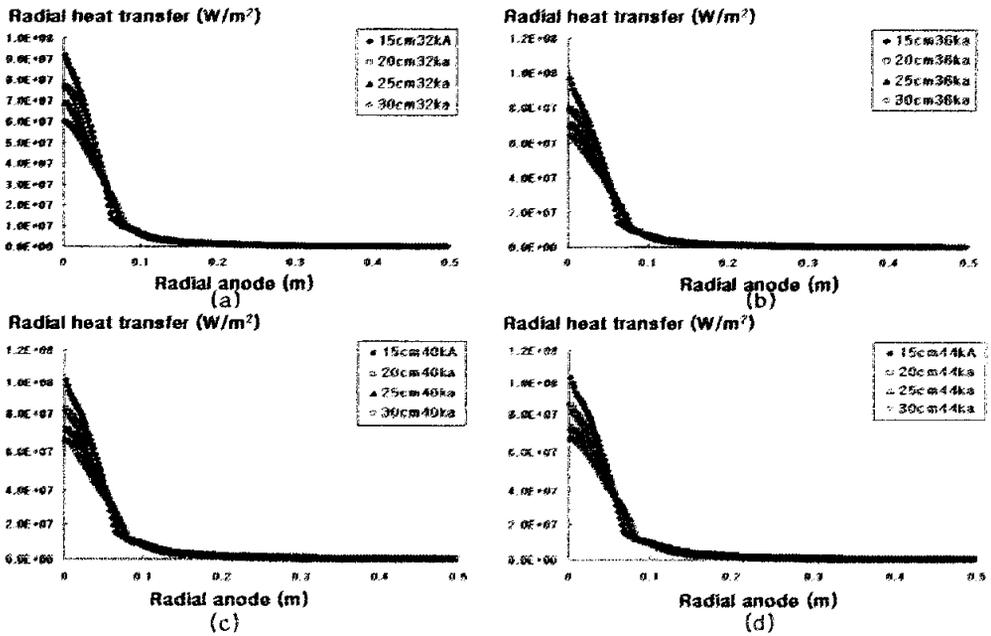


Fig. 3.8 Heat transfer from the arc to the steel bath at the anode

### 3-2-2 전류세기 변화에 따른 특성

아크길이 각각 0.15m~0.30m 로 고정시키고, 전류세기를 32kA~44kA로 변화하여 수치 계산을 수행하였고, 그 결과는 Fig. 3.9~3.12에 그래프로 나타내었다. Fig. 3.9는 steel Bath 표면에서의 아크 반경방향 속도를 나타낸다. 각 모델은 동일한 속도 분포를 나타낸다. Bath 표면 0.03m~0.05m의 아크 반경 중심부까지 2차함수로 급격하게 증가하며, 그 이후로는 속도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 각각 아크 길이를 고정시키고 전류를 변화시킨 모델의 steel bath에서 속도 분포는 동일한 형태를 나타내며, 아크 반경내에서 최대 반경 속도는 전류 세기가 클 수록 속도 분포의 크기가 큼을 알 수 있었으며, 반경방향 운동량식에서 source 로 작용하는 Lorentz힘( $J_z B_\theta$ )이 크므로 속도크기가 전류 세기에 비례하여 큼을 알 수 있다. 그리고 전류 세기가 아크 길이가 짧을 수록 반경방향 속도 최대값은 축에 가까운 지점에서 발생하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3.10은 반경방향 전단 응력을 나타낸다. 반경방향 전단응력은 Bath 내부 유동에 중요한 벡터이며, 내부 유동을 계산하기 위해 초기 경계조건으로 부여 된다.  $\tau = \mu \frac{\partial v_r}{\partial z}$ 로 계산되기 때문에 속도 분포와 동일한 분포가 됨을 알 수 있다. 이 역시 전류세기가 클수록 steel bath 에서의 전단응력 분포가 큼을 알 수 있다.

Fig. 3.11은 Steel bath 표면에서의 온도 분포를 나타낸다. bath 표면에서의 온도는 인가 전류에 대해서 아크 길이가 일정하면 비슷한 분포를 나타냄을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 3.12는 아크에서 Steel bath 내부로 전달되는 heat flux를 나타낸다. 이 역시 전류세기가 큰 44kA 일때 최대 열유속을 보이고 있어 전류세기가 클수록 열유속이 큼을 알 수 있다.

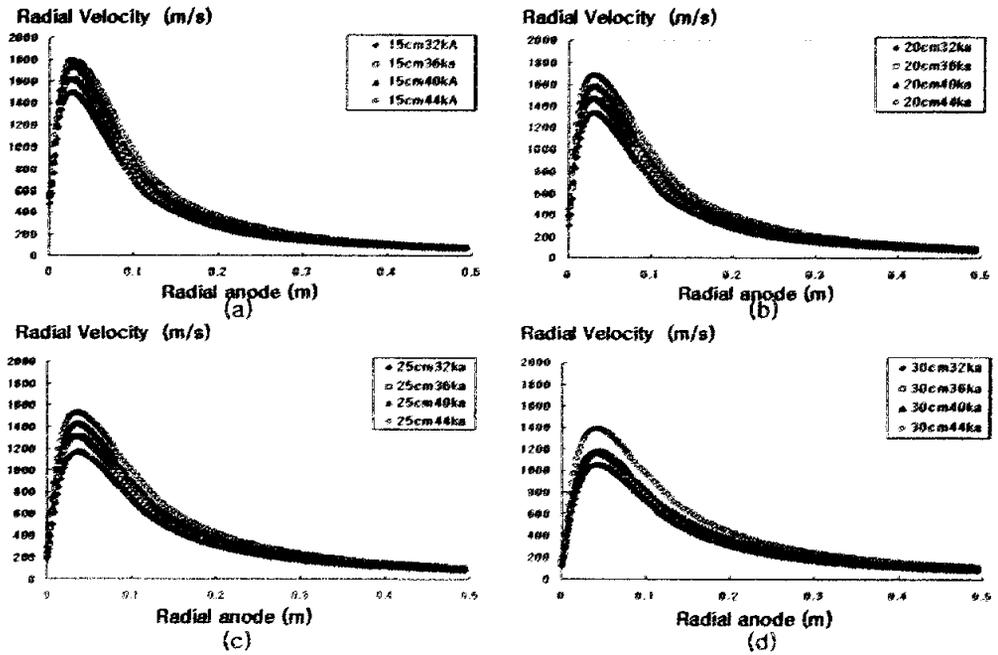


Fig. 3. 9 Radial velocities at the anode

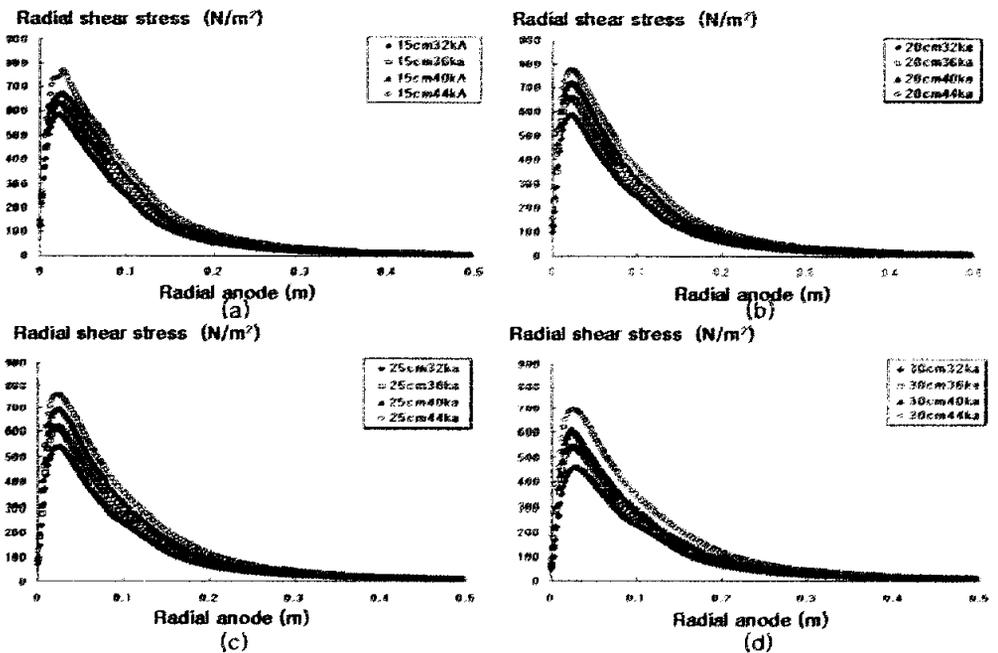


Fig. 3.10 Radial shear stresses at the anode

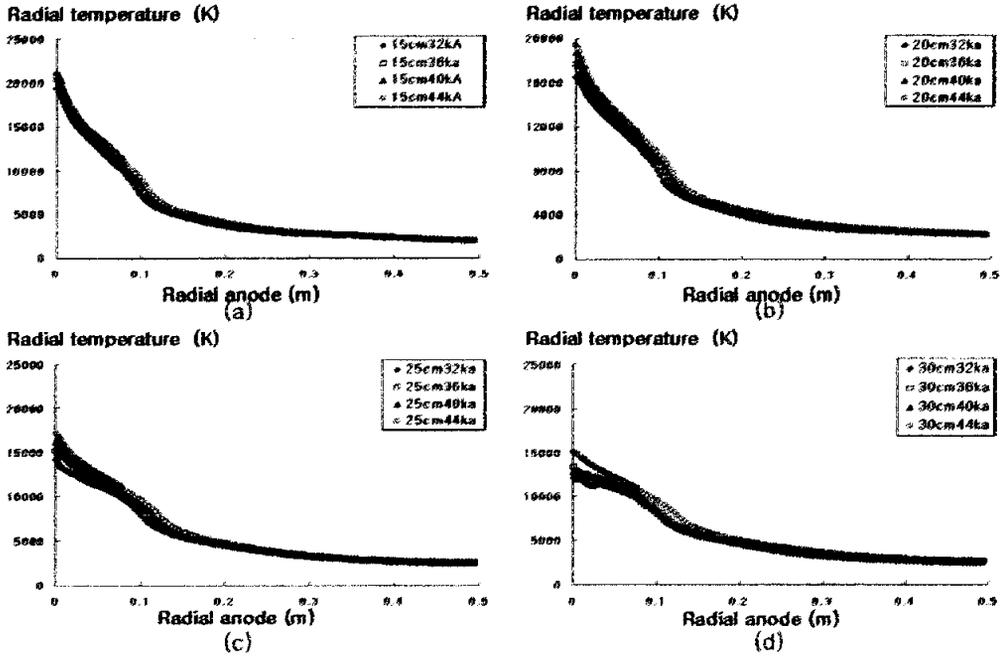


Fig. 3.11 Radial temperatures at the anode

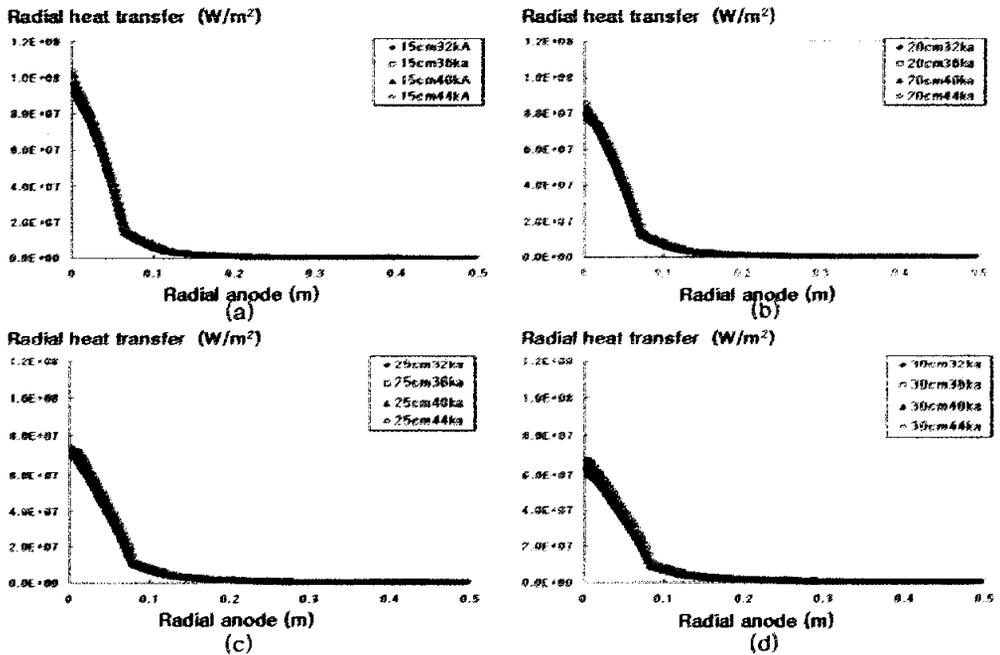
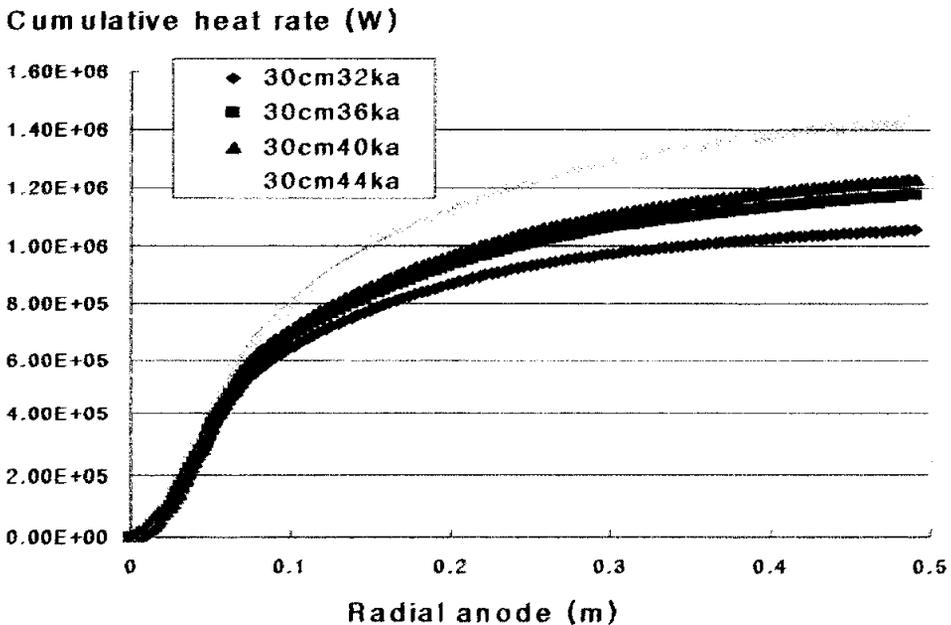


Fig. 3.12 Heat transfer from the arc to the steel bath at the anode.

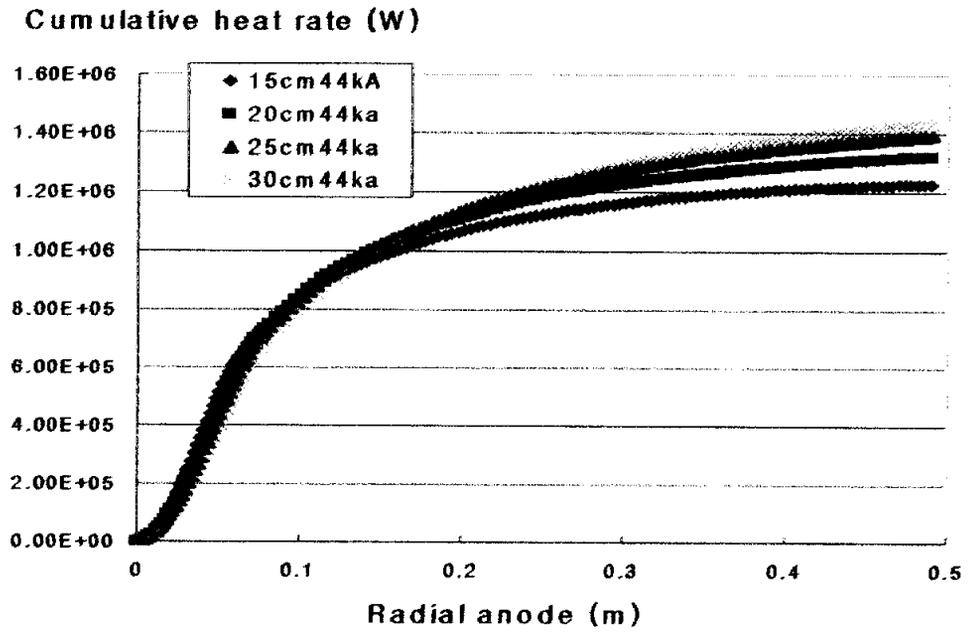
### 3-2-3 누적 열유속

Steel bath로 유입되는 cumulative heat flux 량은 Fig. 3.13과 같다. Fig. 3.13은 각 전류세기 및 아크길이에 따른 steel bath로의 누적 열량으로 아크 길이가 일정할 경우 전류세기가 클수록 bath로 유입되는 heat flux 량이 크고, 전류세기가 일정한 경우 아크길이가 길수록 bath로 유입되는 Cumulative heat flux는 큼을 알 수 있다. 그리고 반경길이 0.08m 인 아크 반경내에서는 heat flux 량이 급격하게 증가하지만 그 이후 완만한 곡선으로 그리는 것을 알 수 있다. 이는 반경내에서 heat flux 량이 큼을 알 수가 있다.

이에 계산한 모델로 Cumulative heat flux 는 아크길이가 0.30m이고, 전류세기가 44kA인 모델이 가장 크다고 할 수 있다.



(a) Cumulative heat rate for difference arc current



(a) Cumulative heat rate for difference arc length

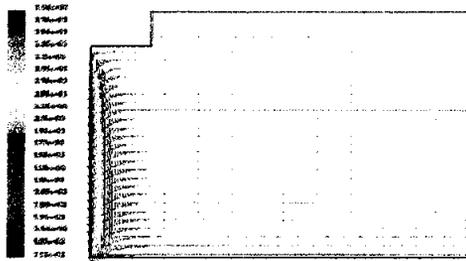
Fig. 3. 13 Cumulative heat transfer to the anode

### 3-2-4 전류 타입(교류)에 따른 특성

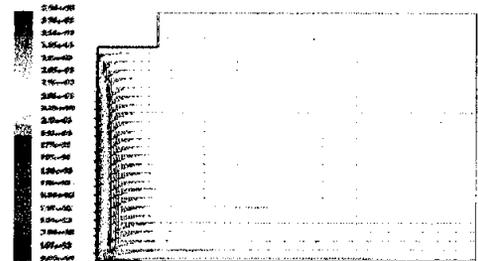
#### 3-2-4-1 순전류

직류 전기 아크의 수치해석 결과를 통해 아크 길이가 길고, 전류세가 커서 큰 모델이 steel bath로 유입되는 cumulative heat flux 량이 크음을 확인할 수 있었다. 이 모델(아크길이 0.30m, 전류세가 44kA)을 기준으로 정하고, 비정상 해석을 위한 초기값으로 부여하여, 교류에 대한 수치 해석을 수행하였다. 이에 대한 수치 해석 결과를 Fig. 3.16~3.25에 나타내었다. Fig. 3.14는 시간의 경과에 따른 속도 벡터를 나타낸다. 시간이 경과할수록(위상이 변함으로써) 인가 전류는 0으로 감소함에 따라 아크 기둥이 작아지고, 기둥에 작용하는 로렌쯔힘도 작아진다. 특히 아크 기둥이 작아 질수록  $J_r$ 보다  $J_z$  값이 감소가 크므로, 아크 기둥 내의 z축 방향 속도 성분  $w$ 의 감소가 크다. Fig. 3.15는 시간 경과에 따른 온도장을 나타낸다. 전류가 0으로 감소할수록 우선 에너지 방정식에서의 Joule heating 의 감소가 Cathode 표면 온도의 감소에 지배적으로 영향을 미친다. 시간이 진행됨으로 도메인 영역의 전반적인 온도 내려감을 알 수 있다.

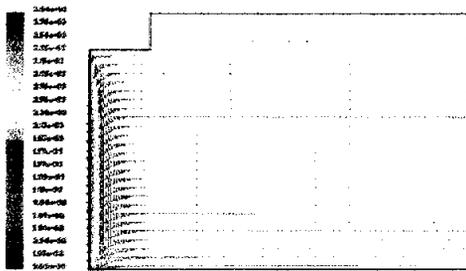
Fig. 3.16은 Steel bath 표면에서의 반경 방향 속도를 나타낸다. 아크 반경이 줄어들어 아크기둥으로 유입되는 공기유량은 적어지고 아크기둥의 끝단, 즉 Bath표면에서 충돌후 공기는 반경방향으로 빠져나간다. 그러나, 아크기둥은 반경방향 로렌쯔힘에 둘러싸여 하나의 파이프 같은 역할을 하게 되고, 아크기둥 내의 유량이 많이 유입될수록 Bath표면에서 빠져 나오는 유량 또한 많아져야 하고, 이로 인해 속도는 증가하게 된다. Fig. 3.17은 Steel bath 표면에서의 반경 방향 온도를 나타낸다. 시간에 따른 전류의 감소로 인해 Bath 표면에서의 아크 반경 또한 이것에 상응하여 감소하고, Bath로의 열 공급범위도 작아진다.



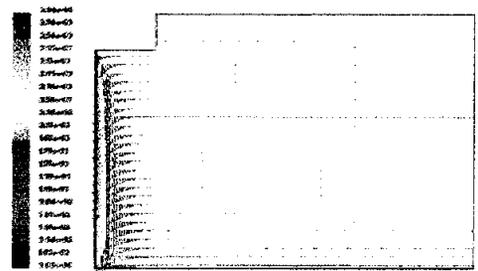
(a) phase is 90°



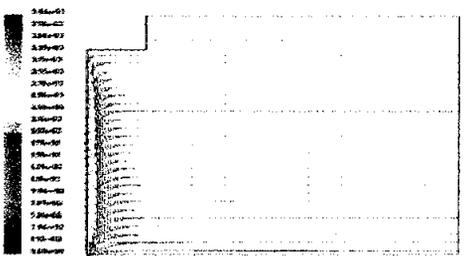
(b) phase is 100°



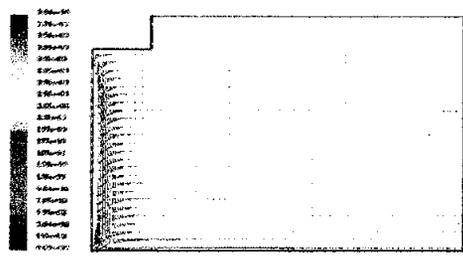
(c) phase is 110°



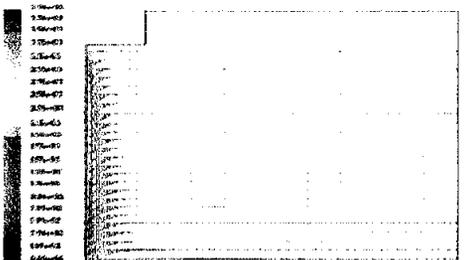
(d) phase is 120°



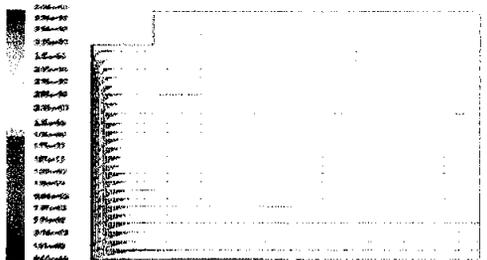
(e) phase is 130°



(f) phase is 140°

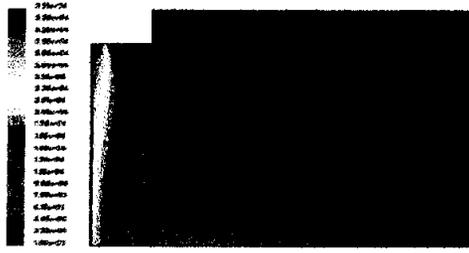


(g) phase is 150°



(h) phase is 160°

Fig. 3. 14 Velocity vectors



(a) phase is 90°



(b) phase is 100°



(c) phase is 110°



(d) phase is 120°



(e) phase is 130°



(f) phase is 140°



(g) phase is 150°



(h) phase is 160°

Fig. 3. 15 Temperature contour

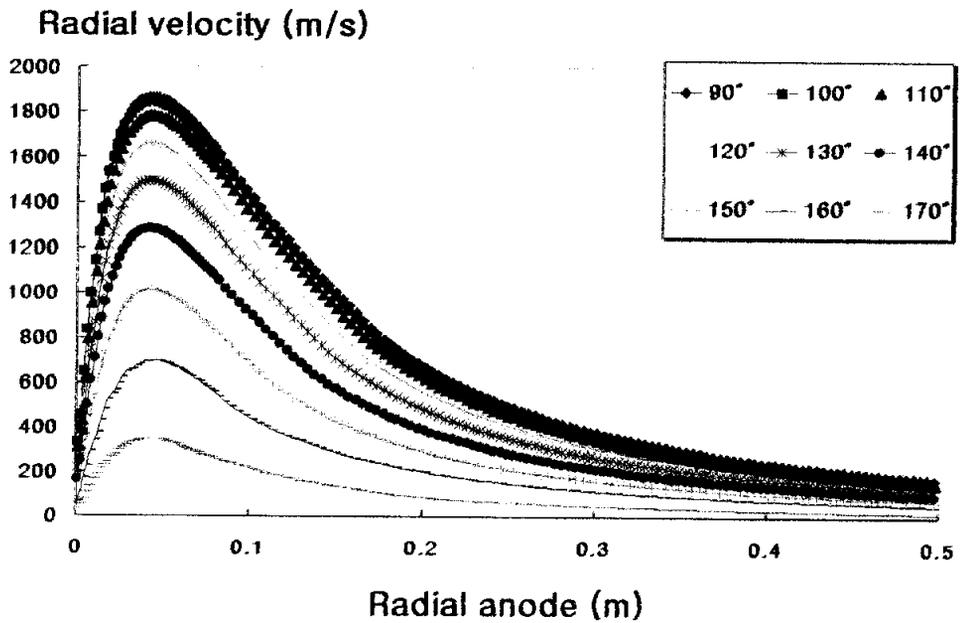


Fig. 3.16 Radial gas velocities at the anode for respective alternating current phase

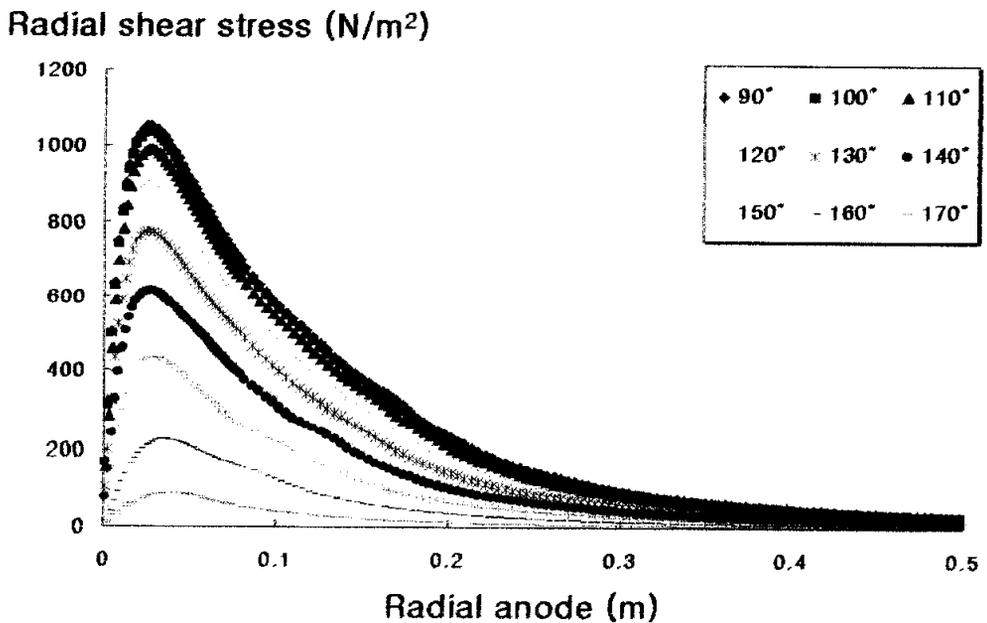


Fig. 3.17 Radial sheares stress at the anode for respective alternating current phase

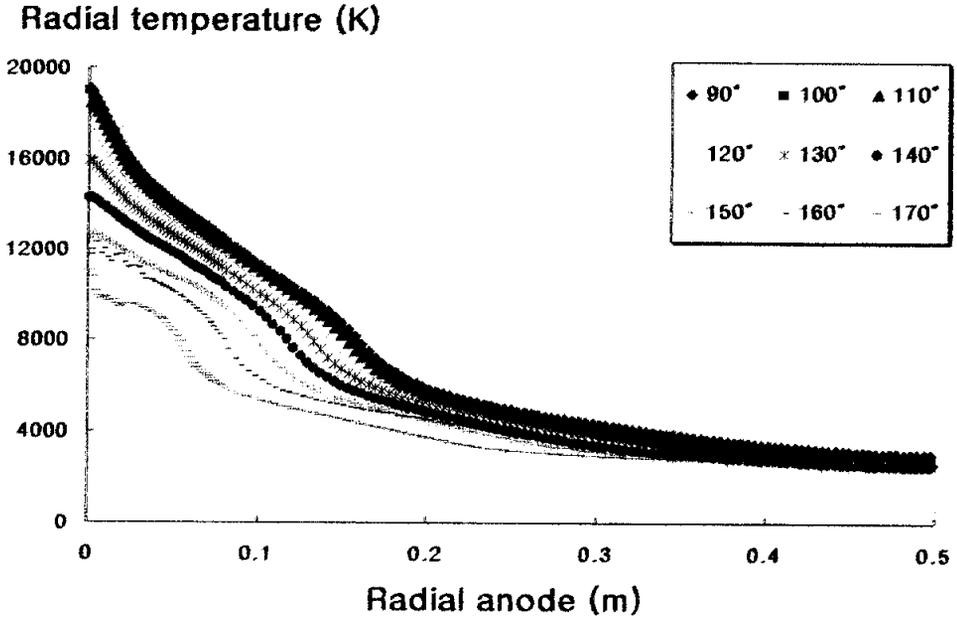


Fig. 3.18 Radial temperature at the anode for respective alternating current phase

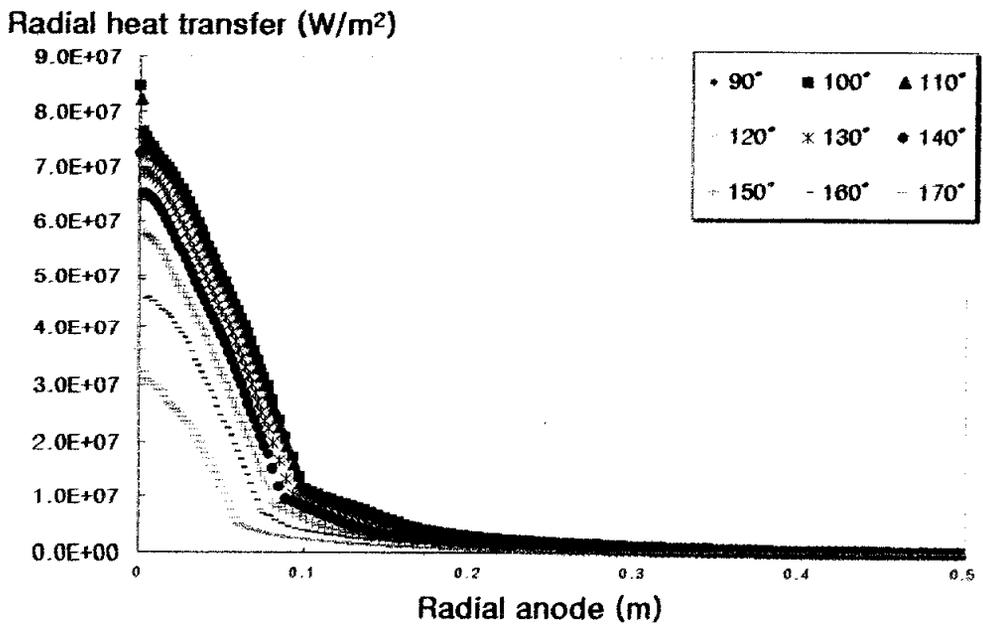


Fig. 3.19 Heat transfer from the arc to the bath at the anode for respective alternating current phase

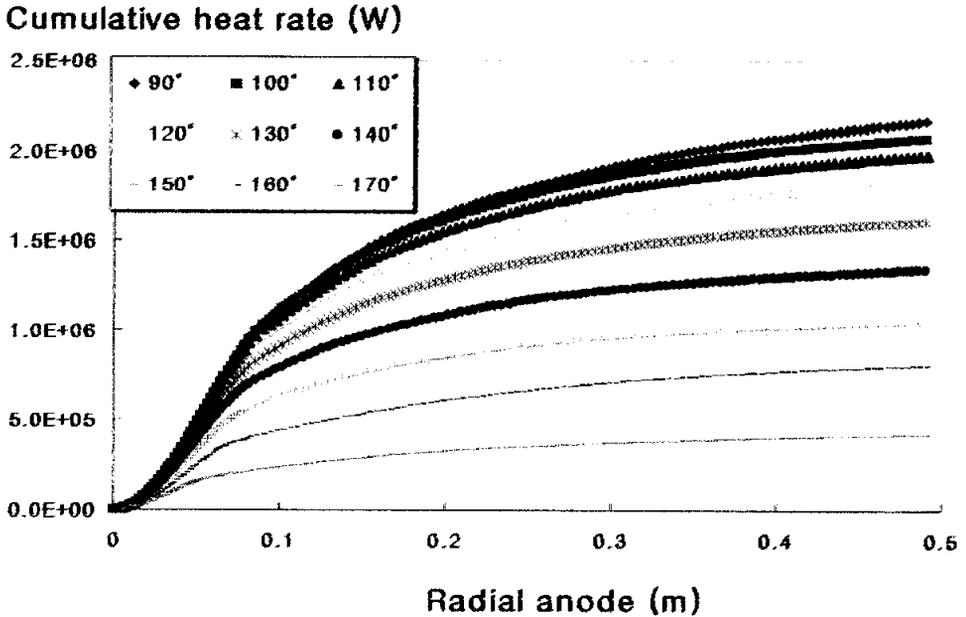


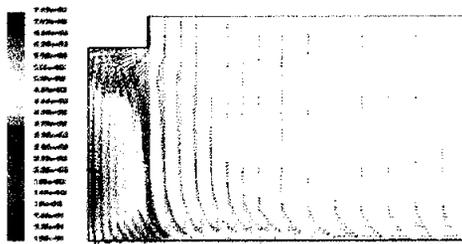
Fig. 3.20 Cumulative Heat transfer from the arc to the bath for respective alternating current phase

Fig. 3.17과 19는 steel bath 표면에서의 전단응력 및 steel bath 내부로 유입되는 heat flux 를 나타낸다. 이 역시 전류가 감소함에 따라 Bath부에서의 반경방향속도, 전류밀도, 양극부 내부온도는 감소하므로 반경방향속도와 양극부 내부온도에 비례하는 대류 열유속은 감소하고, 전류밀도와 양극부 내부온도에 비례하는 Thompson effect도 감소, 전류밀도에 비례하는 전자소멸에 따른 효과도 감소한다. 그리고, 전류가 높을수록 전류밀도에 비례하는 Joule Heating에 의해 cathode 음극점에서의 온도는 높고, 이것은 Bath표면으로 더욱더 많은 복사열을 가하게 되어 Bath 표면의 전반에 걸쳐 온도를 상승시킨다. 이러한 이유로 인해 전류가 낮을수록 Bath부로 공급하는 전체 열 플럭스는 감소하게 된다. Fig 3.20 은 각 위상의 cumulative heat flux를 나타낸다. 이 역시 위상이 변함에 의해 전류가 낮아지며, steel bath 유입되는 총 누적 열량은 작아지는 것을 알 수 있다.

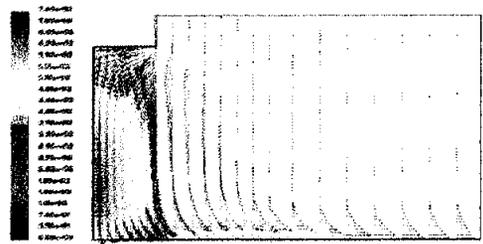
### 3-2-4-2 역전류

역전류 역시 순전류와 비슷하게, 아크의 형태가 일정한 포물선 형태를 가진다고 가정하였고, 각각 음극부와 양극부의 생성향과 소멸향을 각 극이 역전되기 때문에 맞게끔 바꿔 적용하였으며, 역전류의 유동 흐름 형태는 순전류 때와 마찬가지로 그라파이트부의 음극부에서 steel bath의 양극부부로 유동이 흐른다고 가정하였으며, steel bath 표면의 대류와 복사에 의한 손실은 순전류 때와 같이 적용하였다. 직류 전기 아크의 수치해석 결과를 통해 아크 길이가 길고, 전류세기가 큰 모델이 steel bath로 유입되는 cumulative heat flux 량이 큼을 확인할 수 있었다. 이 모델(아크길이 0.30m, 전류세기 44kA)을 기준으로 정하고, 비정상 해석을 위한 초기값으로 부여하여, 교류에 대한 수치 해석을 수행하였다.

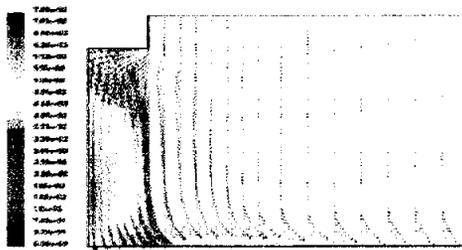
Fig. 3.21은 시간의 변화(위상의 변화)에 의한 속도 벡터를 나타낸다. 순전류일 때와 마찬가지로 유동의 방향은 위쪽에서부터 아래쪽으로 향하였지만, 속도의 크기는 순전류일 때와 비교하여 크게 줄어들음을 알 수 있다. 시간이 경과할수록 전류의 크기는 0으로 되므로 결과적으로 로렌쯔 힘도 작아져 속도는 줄어든다. Fig. 3.22는 시간의 변화에 대한 온도장을 나타낸다. 최대온도는 양극인 그라파이트 부에서 나타났다. 이 역시 시간이 경과할수록 전류의 크기가 작아지므로 전체적인 온도가 내려감을 알 수 있다. Fig. 3.23은 steel bath 표면에서의 반경 방향 속도를 나타낸다. 이 역시 아크 반경 내에 시간의 변화에 따라 로렌쯔 힘의 크기가 감소됨으로 인해 속도가 감소됨을 알 수 있으며, 반경 방향 속도의 함수인 전단 응력 역시 Fig. 3.24와 같이 시간의 변화(위상의 변화)에 감소됨을 확인할 수 있다.



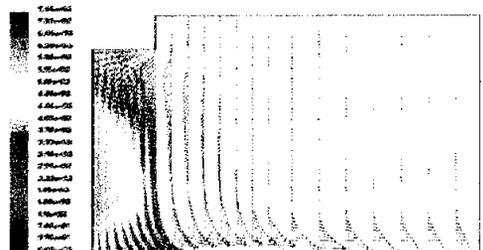
(a) phase is 270°



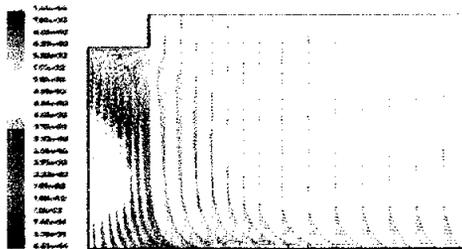
(b) phase is 280°



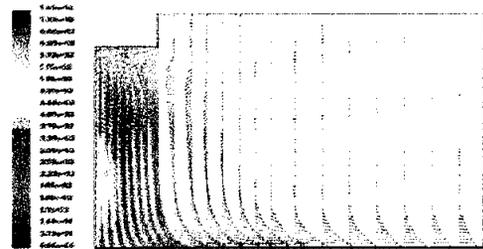
(c) phase is 290°



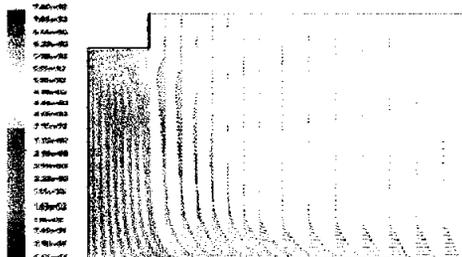
(d) phase is 300°



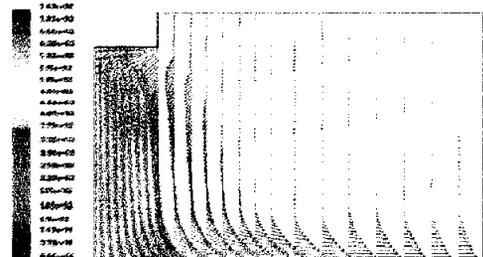
(e) phase is 310°



(f) phase is 320°

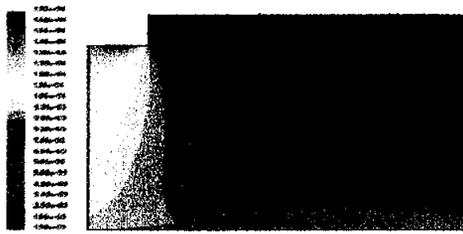


(g) phase is 330°

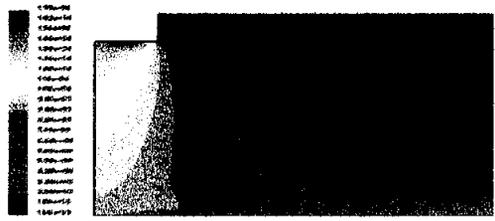


(d) phase is 340°

Fig. 3.21 Velocity vectors



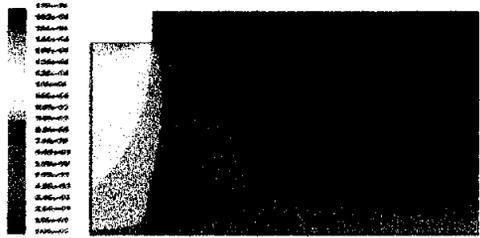
(a) phase is 270°



(b) phase is 280°



(c) phase is 290°



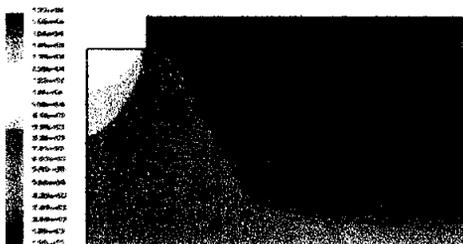
(d) phase is 300°



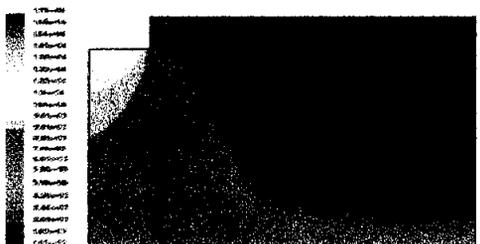
(e) phase is 310°



(f) phase is 320°



(g) phase is 330°



(d) phase is 340°

Fig. 3.22 Temperature contour

Radial velocity (m/s)

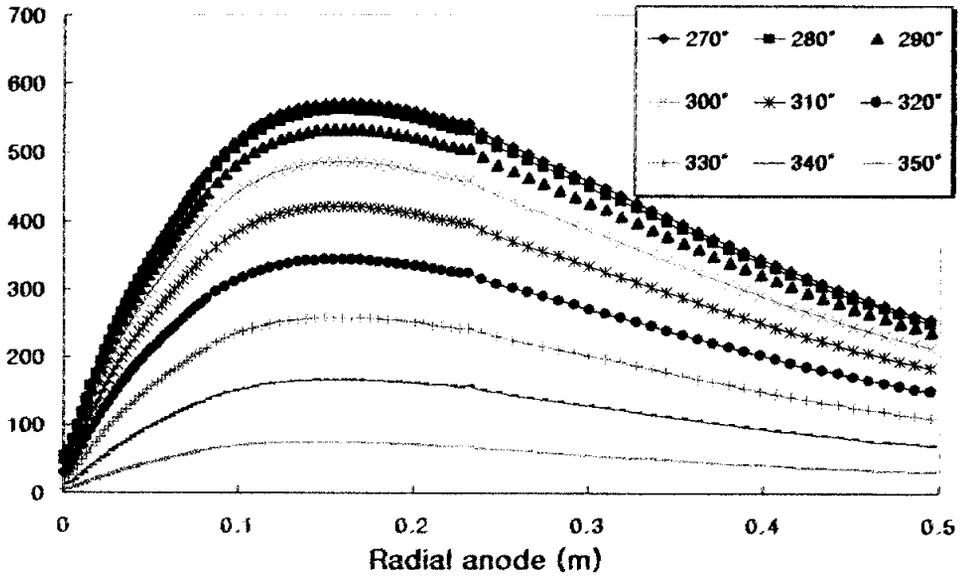


Fig. 3.23 Radial gas velocity at the anode for respective alternating current phase

Radial shear stress (N/m<sup>2</sup>)

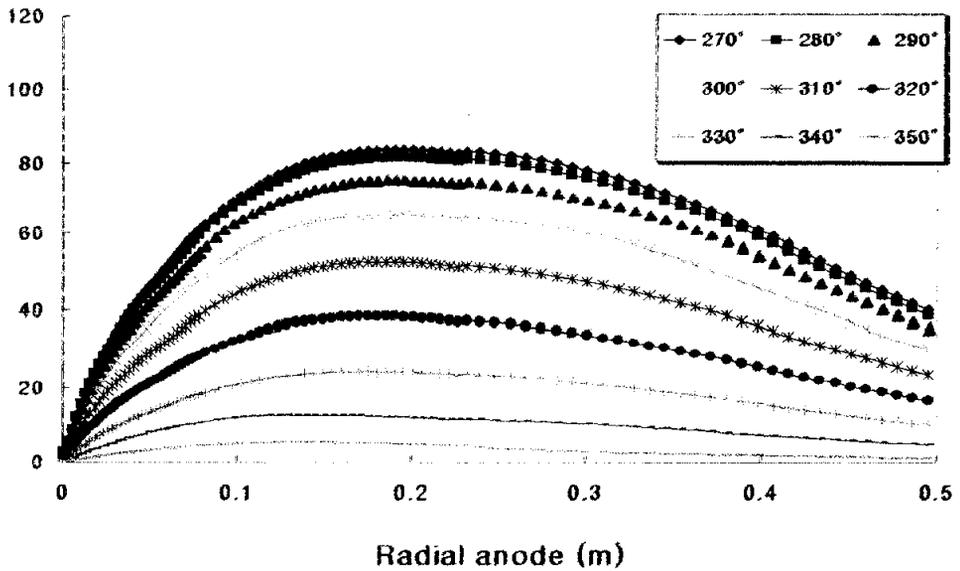


Fig. 3.24 Radial shear stress at the anode for respective alternating current phase

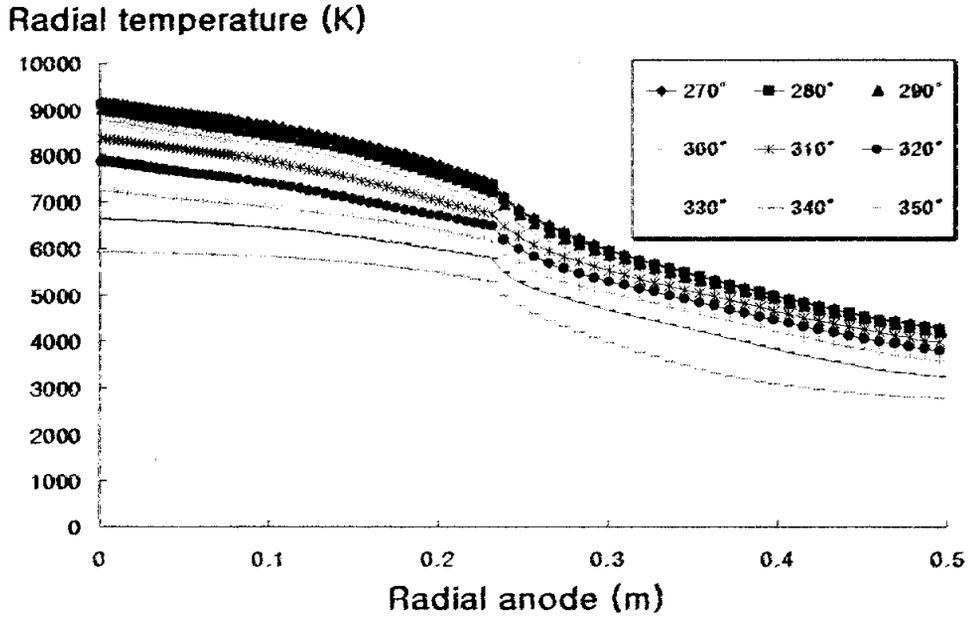


Fig. 3.25 Radial temperature at the anode for respective alternating current phase

Fig. 3.25은 전류세기 변화에 따른 steel 표면에서 온도 분포를 나타낸다. 시간의 변화에 따른 전류 크기의 감소로 인해 Bath 표면의 온도가 낮아짐을 알 수 있고, 에 따라 온도에 의해 변화하는 heat flux 역시 감소함을 알 수 있다.

## 4 결론

직류 및 교류 전기아크로의 대상으로 플라즈마 특성을 해석하기 위하여 2차원 축대칭의 정상상태 수치해석을 수행하였다. 직류 전류 일때, 아크 길이와 전류 세기의 변화에 대한 모델과 이에 가장 누적 열량이 많은 모델과 교류 모델과 비교하여 수치해석을 수행하였다.

(1) 수치계산의 타당성을 검증하기 위해서, 작은 크기의 전기 아크로의 실험 데이터와 비교한 결과 축방향 속도 및 온도가 잘 일치함을 알 수 있었다.

(2) DC 아크로에서 아크 길이 변화에 따른 플라즈마 화염은 아크 길이가 길수록 steel bath 표면으로 유입되는 누적 열량이 많음을 확인하였다

(3) DC 아크로에서 전류세기의 변화에 따른 플라즈마 화염은 전류 세기가 클수록 steel bath 표면으로 유입되는 누적 열량이 많음을 확인하였다.

(4) AC 아크로에서의 수치해석 결과 역전류일 때 경계조건의 처리와 물리적 현상에 대한 많은 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. J. Szekely, 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
2. J. Mckelliget and J. Szekely, 5th Arc furnace meeting, Budapest, Hungary, 1985
3. A.M.Fudolig, H.Nogami, J.Yagik, Mimura and M.Isshiki, "Prediction of Surface Temperature on Metal Beads Subjected to Argon-Hydrogen Transferred Arc Plasma Impingement", ISIJ International, Vol.37,No.6, pp. 623~629, 1997
4. 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
5. 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

6. 이동은, 김상준, “플라즈마 화염에서의 열전달현상 해석”, RIST 연구논문 제 16 권, 제 3 호, pp. 303~310, 2002
7. 한성숙, “직류·고주파 혼성 플라즈마 토치의 열플라즈마 특성에 관한 수치해석적 연구”, 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 1998
8. 김진수, “전기장 해석을 통한 아크 열/유동의 수치해석”, 부산대학교 대학원 석사학위 논문, 2001

## 감사의 글

언제나 저를 의견을 따라 주시고 믿어 주셨던 아버님, 어머님께 정말 감사하고 사랑한다는 말을 이 지면을 빌려 드리고 싶습니다. 그리고 물심양면으로 지원해 주신 형, 누나, 매형 그리고 지난 12월에 결혼을 한 나의 피양새 지은이 그리고 장모님에게도 감사의 말을 전합니다. 우리 영도 짤라이 친구들 강현규, 고용훈, 원건우, 전현철, 현철민(가나다 순임)에게도 감사의 말을 전합니다.

지도교수님이시며 항상 많은 관심과 배려를 그리고 엔지니어로서 가져야 할 마인드를 심어 주신 이연원 교수님께 진심으로 감사의 말을 전합니다. 그리고 지식의 밑거름을 주신 김남식 교수님, 이도형 교수님, 권오봉 교수님, 배대식 교수님께도 감사드립니다.

2여년 동안 동고동락하며 많은 조언과 도움을 준 이영환 선배, 김영국 선배, 김태식 선배 그리고 졸업을 한 김태훈 선배, 김상현 선배, 김재열 선배, 그리고 친 형처럼 때론 친구처럼 지난 곽수민 선배께 감사의 말을 전합니다. 그리고 학부 선배이자 실험실 후배인 이종훈 및 이제 입학하게 될 리리양 감사의 말을 전합니다. 그리고 학부생 백두원, 양승훈, 김홍주에게도 수고했다는 말을 전합니다. 그리고 95학년 기계공학부 동기 및 대학원 동기들에게 감사의 말을 전하며, 앞날의 건승을 기원합니다.

2003년 12월

한 병 윤 배상