

자계가 인가된 진공아크의 확장 모의

Simulation of Vacuum Arc Expansion with Magnetic Field

최원준, 최승길, 고광철*, 강형부*

한양대학교 전기공학과, *한양대 전자전기공학부

Won-joon Choe, Seung-kil Choi, Kwang-cheol Ko, Hyung-boo Kang
Hanyang University

Abstract

Axial magnetic field generated by special electrode construction in vacuum interrupters is used to extinguish electric plasma arcs. This investigation by FDM should prove to what extent the magnetic field might influence on the arc expansion. The calculated results show that the stronger magnetic field induced the lesser radius of arc plasma. This study will help to offer good data in design of vacuum interrupters.

Key words : Vacuum Interrupter, Axial magnetic field, vacuum arc

1. 서 론

최근 전력계통 부하의 증가로 차단용량을 대형화시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 전류차단후 절연회복시 진공이 갖는 특이한 전류재단 현상에 의해 발생하는 개폐서지 전압의 저감을 위해 다양한 전극재료개발이 이루어지고 있으며, 축방향 또는 반경방향 자계를 발생시켜 차단시 발생하는 아크구동력에 의해 분산 및 억제함으로써 차단용량을 증대시키기 위한 특이한 전극구조 및 형상에 대한 연구가 이루어지고 있다.

축자계는 고장 전류 차단시 발생하는 아크의 확산을 억제하므로 양극의 전압강하가 발생하지 않기 때문에[1], 축자계를 발생시키기 위한 전극구조를 갖는 진공차단기는 동일한 크기의 일반차단기와 비교해서 더 큰 차단전류 개폐능력을 가지며, 긴 수명 특성을 지닌다. 또 차단용량은 전극의 지름과 비례하기 때문에 이론적으로는 차단전류 용량에는 한계가 없다고 할 수 있다[2].

이에 본 연구에서는 진공인터럽터(Vacuum Interrupter)에서 사고전류 차단시 발생하는 진공 아크의 축자계에 의한 영향에 대한 사전 검토로서 모의하고자 한다.

2. 본 론

2.1 아크 플라즈마 모델링

플라즈마 해석방법은 크게 플라즈마내 입자를 추적하는 방법과 입자의 흐름을 유체로 보고 유체역학적으로 해석하고자 하는 방법으로 나뉜다. 그러나 아크 플라즈마는 다른 플라즈마에 비해 대전류가 흐르는 상태이므로 입자 하나하나를 추적하는데는 무리가 있어 유체역학적으로 해석하고자 하였다.

본 연구에서는 아래 그림과 같이 음극에서 양극 쪽으로 확장하는 아크플라즈마의 특성을 모의하고자 하였다.

그러나 이 아크플라즈마를 해석하는 데는 몇 가지 어려움이 따른다. 첫째, 확장되는 영역의 경계가 변화하므로 경계조건을 주기가 어렵다. 둘째, 음극에서 분출된 아크플라즈마의 모양에 양극의 구조가 영향을 줄 수 있기 때문이다.

그래서 해석을 쉽게 하기 위해 다음과 같은 가정과 초기조건을 주었다.

(1) 전극사이에 코일을 감아 다양한 자계를 인가하고 플라즈마 확장에 양극의 영향을 무시하기 위해 양극은 매우 반경이 큰 판으로 가정하였다.

- (2) 그리고 아크 플라즈마는 안정상태이다.
 (3) 아크 플라즈마는 완전히 전리되어 있다.
 (4) 아크 플라즈마는 준중성 상태이며, 플라즈마 내 온도변화는 없다.
 (5) 음극가까이에는 $10^{20}m^{-3}$ 의 밀도, 아크전류는 200A, 전자의 온도는 2eV, 이온의 온도는 1eV, 전극간 간격은 10 cm로 하였다.

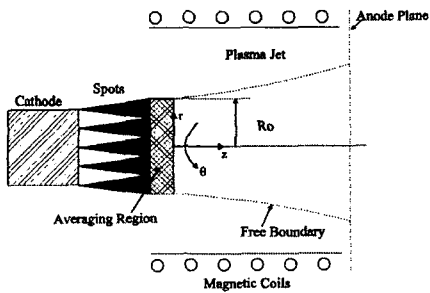


그림1. 진공 아크 플라즈마 모델링

2.2 수치해석

본 연구에서는 아크 플라즈마를 유체역학적으로 해석하고자 하였다. 그러면 유체의 기본방정식중 질량보존식, 모멘텀 보존식을 이용해 다음과 같은 비선형 미분 방정식을 얻을 수 있다[3]. 음극에서는 일정량의 증기가 계속 방출된다고 가정하고 차분법을 이용하여 아크 플라즈마의 밀도, 속도 등의 특성을 구하게 된다.[5]

$$m_i (V_i \cdot \nabla) V_i = -k(Z_i T_e + T_i) \nabla \ln N + \frac{j \times B}{N} \quad (1)$$

$$j = \sigma \left\{ E + \frac{kT_e}{e} \nabla \ln N - \frac{j \times B}{en} + (V_i \times B) \right\} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (V_i N) = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot j = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{kT_e}{e} \left\{ \frac{\partial^2 N}{N \partial z^2} - \left(\frac{\partial \ln N}{\partial z} \right)^2 \right\} \\ + \frac{2\beta_e^2}{(1+\beta_e^2)^2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} - \frac{kT_e}{e} \cdot \frac{\partial \ln N}{\partial r} \right) \\ + \frac{1}{1+\beta_e^2} \left\{ \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial \phi}{r \partial r} + \frac{kT_e}{e} \left(\frac{\partial \ln N}{\partial r} \right)^2 \right. \\ \left. - \frac{kT_e}{e} \cdot \frac{\partial^2 N}{N \partial r^2} - \frac{kT_e}{e} \cdot \frac{\partial \ln N}{r \partial r} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 V_i 는 이온의 속도, Z_i 는 이온화도, T_e 는 전자의 온도, T_i 는 이온의 온도, N 은 입자

의 수밀도, j 는 전류밀도, k 는 볼츠만 상수, ϕ 는 퍼텐셜을 나타낸다.

먼저 자유공간에서의 아크플라즈마 확장을 다루기전에 원뿔모양의 노즐을 생각해 볼 수 있다. 노즐의 모양은 그림2와 같다.

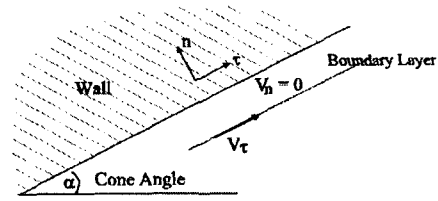


그림2. 원뿔형 노즐에서 아크플라즈마 확장

(1)식을 통해 얻어진 식을 위의 그림에서와 같이 $\tau - n$ 좌표에 관한 식으로 고칠 필요가 있다.

$$V_n \frac{\partial V_r}{\partial n} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial \tau} = -C_s^2 \frac{\partial \ln N}{\partial \tau} \quad (6)$$

여기에서 $C_s^2 = k(Z_i T_e + T_i) / m_i$, $M = V_o / C_s$ 이다.

노즐벽에서 노즐벽에 수직인 속도 성분 V_n 이 없다는 경계조건을 주면 노즐벽에 평행인 속도 성분 V_r 를 구할 수 있다.

이제 자유공간에서의 확장을 고려하면 앞서 다룬 원뿔형 노즐에서 확장하면 된다. 이는 자유공간에서 축자계가 아크플라즈마 확장에 주는 영향을 각 α 의 노즐로 대체할 수 있기 때문이다[4]. 단지 그 원뿔형 노즐의 각 α 가 변한다는 것만 고려하면 된다.

이때 각 α 의 변화율은 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다.

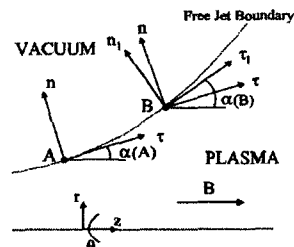


그림3. 자유영역에서 플라즈마 제트의 확장

$$\alpha(B) - \alpha(A) = \tan^{-1}(V_n/V_t) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = \frac{1}{1 + (V_n/V_t)^2} \cdot \frac{(\partial V_n/\partial \tau)V_t - (\partial V_t/\partial \tau)V_n}{V_t^2} \quad (8)$$

각의 변화율을 이용하여 아크 플라즈마의 반경을 구할수 있다.

3. 결 과 및 고 찰

먼저 원뿔형 노즐을 고려했을 때 초기속도를 달리 했을 때 축상에서의 밀도 분포는 그림4, 그림5와 같다.

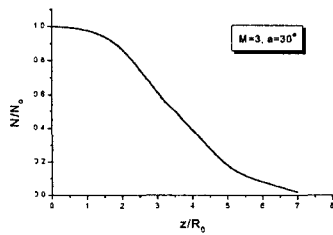


그림4. M=3, $\alpha=30^\circ$ 일 때 밀도분포

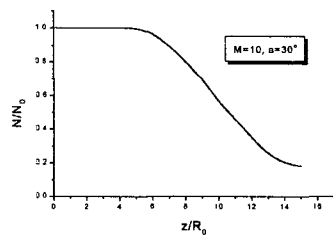


그림5. M=10, $\alpha=30^\circ$ 일 때 밀도분포

그림6은 노즐각 30° 의 공간에서 아크 플라즈마 밀도를 도식적으로 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 밀도분포는 초기속도와 매우 밀접한 관련이 있으며 음극에 가까운 영역에서 심한 불균형 상태이다가 음극에서 멀어지면서 균일하게 퍼진다는 것을 알 수 있었다.

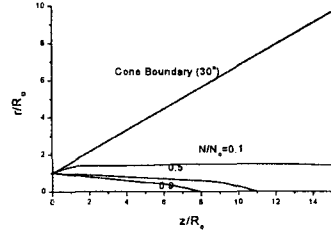


그림6. 노즐각 30° 내의 아크 플라즈마 밀도 분포

다양한 자계를 주었을 때 각 α 의 변화율 이용하여 구한 반경의 변화를 그림8에서 보였다. 그림에서 강한 자계하에서 아크 플라즈마 반지름이 작아 지는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 그림9는 반경에 따른 밀도 분포를 나타낸 그림이다.

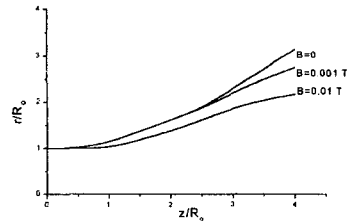


그림8. 자계에 따른 아크플라즈마 반경 변화 (M=5의 경우)

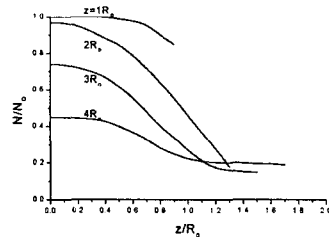


그림9. 반경에 따른 밀도 분포 (B = 0.01T의 경우)

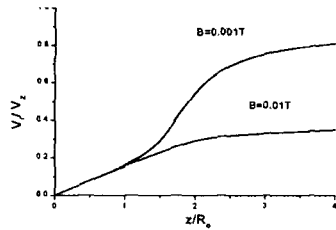


그림10. 플라즈마 경계에서 자계에 따른
반경방향 속도와 축방향 속도의 비
(M=5의 경우)

그림10은 경계면에서의 축방향 속도 v_z 와 반경방향 속도 v_r 의 비를 나타낸 그래프로서 자계가 강할수록 플라즈마 확장에 직접적으로 관계있는 반경방향의 상대 속도가 두드러지게 작아지는 것을 볼 수 있다.

추후 아크 소호를 위해 발생시킨 축자계와 아크 전류의 흐름으로 인해 발생하는 횡자계간의 상관관계(dynamo 이론)를 고려할 필요가 있겠다.

참 고 문 헌

- [1] Osami Morimiya, "Theoretical and Experimental Study of a High-current Vacuum Arc in a Uniform Axial Magnetic Field", Journal of Applied Physics, Vol.71, No.1, pp.101-107, January 1992
- [2] Kenji Watanabe, Eiji Kaneko, and Satoru Yanabu, Fellow, IEEE "Technological Process of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters", IEEE Trans. on Plasma Science, vol.25 No.4, pp.609-616, August 1997
- [3] 손병진, 맹주성, 이상환, "詳說 流體力學 (上)", 喜重堂.
- [4] M.Keidar, I.I.Beilis, R.L.Boxman, S.Golds-mith, "Voltage of the Vacuum Arc with a Ring Anode in an Axial Magnetic Field", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol.25, No.4, pp.580-585, August 1997.
- [5] 電氣學會放電ハンドブック出版委員會編 "放電ハンドブック", 電氣學會, 1975