

스위칭 아크 방전의 거동에 관한 연구

정연하*, 장태준, 송길목, 노영수, 곽희로
 송실대학교

Study on the Behavior of Switching Arc Discharge

Yeon-Ha Jung, Tae-Jun Jang, Kil-Mok Shong, Young-Su Roh, Hee-Ro Kwak
 Soongsil University

Abstract - 전기 기기의 스위칭 동작시 발생하는 아크로 인한 화재 및 감전사고가 발생하고 있다. 본 논문에서는 간단한 스위칭 동작을 할 수 있는 회로를 구성하여 아크 방전을 시킨 후 고속 카메라를 이용하여 아크 방전의 거동 과정을 분석하였다. 또한, 유한요소해석법으로 전자계 현상을 분석하였다.

1. 서 론

아크 상태는 적은 영역에 매우 많은 캐리어가 존재하게 되어 대전류를 통전할 수 있게 하는데, 고전압 분야에 있어서 아크(Arc)는 극부적으로 열을 급격히 상승시켜 주변기기에 악영향을 주는 것으로 많이 알려져 있다. 따라서 아크가 한곳에 집중되어 수초정도 머무르게 되면 전극을 증발시켜 손상을 시키고 더 나아가 화재로까지 발전한다. 아크 방전에 대한 연구의 중요성은 아크를 유용한 방법으로 이용할 뿐만 아니라 아크 거동(arc behavior)을 분석하여 아크 발생시 열손실에 의한 원인을 개선하는 기술이 필요하기 때문이다. 따라서 열손실을 최소화하는 기술과 아크 유도 및 제거기술을 확보하기 위해서는 아크 거동을 실험과 이론적으로 분석하는 연구가 필요하다.

본 논문에서는 아크방전의 특성을 분석을 위한 기초실험으로 간단한 아크발생 회로를 만들어 스위치 개폐에 의한 아크를 발생시킨 후, 이를 고속 카메라로 촬영하였다. 그리고 유한요소법을 이용한 전자계 현상을 모의하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 아크 해석

회로 개폐시의 아크현상을 해석하기 위해서는, 아크 채널 주위의 전도, 대류, 방사에너지 전달뿐만 아니라 아크 전류에 의한 전자기력, 난류효과, 노즐 용삭, 아크 접점의 용손시에 발생하는 금속증기의 영향과 같은 복잡한 물리적 현상을 엄밀히 고려해야 한다.

본 논문에서는 실험적인 아크 특성 해석을 위해, 각각의 물리적 현상에 대해서 간단히 설명하기로 한다[1-2].

차단부 스위치의 간극 내 아크유동은 축방향으로의 흐름이 절대적이므로, 지배방정식을 세울 때, 원주방향의 유동은 무시할 수 있다. 또한 회전축에 대해서는 대칭으로 근사할 수 있으므로, 원통좌표계(θ, r, z) 내의 아크를 해석하기 위한 지배방정식은 연속방정식, r 방향 운동량 보존방정식, z 방향 운동량 보존방정식, 에너지 보존 방정식 등으로 표현할 수 있다.

(1) 연속방정식

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

여기서, ρ는 분위기 가스의 밀도, v와 w는 각각 r 방향, z 방향의 속도성분을 나타낸다.

(2) r 방향 운동량 보존방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r\rho v^2 - r\Gamma_1 \frac{\partial v}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho v w - \Gamma_1 \frac{\partial v}{\partial z}] \\ &= -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r\Gamma_1 \frac{\partial v}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial z} [\Gamma_1 \frac{\partial w}{\partial r}] - \frac{2\mu v}{r^2} + \\ & (\vec{J} \times \vec{B})_r \end{aligned}$$

(3) z 방향 운동량 보존방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r\rho w v - r\Gamma_1 \frac{\partial w}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho w^2 - \Gamma_1 \frac{\partial w}{\partial z}] \\ &= -\frac{\partial P}{\partial z} + (\vec{J} \times \vec{B})_z \end{aligned} \quad (3)$$

운동량 보존방정식에서 $\Gamma_1 = \mu + \mu_t$ 로 점도항(viscous term)으로 μ 와 μ_t 는 각각 층류(laminar)와 난류의 점성도(turbulent viscosity)이고, \vec{J} 와 \vec{B} 는 각각 전류밀도, 자속밀도를 나타내는 벡터량이다. 특히, $\vec{J} \times \vec{B}$ 는 아크 자신이 발생한 자장에 의해 받는 힘(Lorentz's force)을 나타내는 것이다.

(4) 에너지 보존방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r\rho h v - r\Gamma_2 \frac{\partial h}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho h w - \Gamma_2 \frac{\partial h}{\partial z}] \\ &= \frac{dP}{dt} + \sigma E^2 - q + \Phi \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, q는 방사에너지 손실, $\Gamma_2 = (k + k_t)/c_p$ 로 k , k_t , c_p 는 각각 층류, 난류의 운동에너지, 정압비열(specific heat at constant pressure)을 나타낸다. σE^2 은 아크로 인해 발생하는 주열열이며, 이때 E는 전계의 세기이다. 또한 Φ는 층류와 난류의 점도에 의한 에너지 소산량이다.

2.2 전자계 해석

아크를 해석하기 위한 지배방정식의 해를 구하기 위해서는 방사전달모델, 난류모델, 전자계 해석이 필요하다.

방사 및 난류모델은 이미 연구된 바 있으며[3-5], 에너지 보존방정식의 해를 구하기 위해서는 우선 아크 주위의 전계분포를 알아야 한다. 다음 식들로부터 전계의 세기를 구한다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (5)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (8)$$

또한, 아크전류에 의해 발생한 자계는 아크 자체에 Lorentz의 힘으로 작용하여 유동의 흐름에 영향을 미치게 되며, 이것은 운동량 보존식 (2), (3)에 $(\vec{J} \times \vec{B})$,와 $(\vec{J} \times \vec{B})_z$ 항으로 포함되어 있다. 아크전류에 의해 유도된 자계는 아크의 축대칭성으로 인해 원주방향의 성분만을 띠게 된다. 따라서, 아크의 투자율이 μ_0 로 일정하다고 가정하면, 자계는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$B = \frac{\mu_0 \int_0^{\zeta} J_z 2\pi \zeta d\zeta}{2\pi r} \quad (9)$$

여기서, J_z 는 전류밀도의 축방향 성분이며, $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ 의 관계로부터 구할 수 있다.

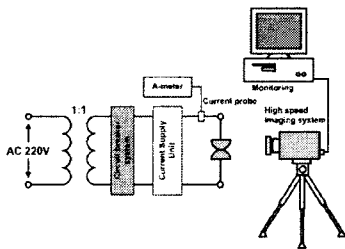
3. 실험 및 결과 분석

3.1 실험 방법

아크를 발생시키기 위해 대전류발생장치를 이용하였으며, 아크거동은 고속카메라를 이용하여 관찰하였다.

본 실험에서는 대전류발생장치를 이용하여 스위치 역할을 하는 반구형 갭에 대전류를 공급한 후, 양 전극에서 발생하는 아크 성장 과정을 관찰하였다.

아크는 스위치 역할을 하는 청동제의 반구형 전극 간에서 발생하도록 실험장치를 그림 1과 같이 구성하였다. 전극은 모터의 구동에 의해 좌우운동이 가능한 가동형 우전극과 고정형 좌전극으로 구성되었다.



(a) 실험장치 개략도



(b) 전극부분

그림 1. 실험장치 구성

3.2 실험 결과 및 분석

이와 같이 구성된 반구형 갭안에 교류 400A의 전류를 공급한 후, 아크가 성장하고 소멸하는 과정을 고속카메라로 관찰하였다. 그림 2는 400A 전류 공급시 아크 성장 과정을 0.4 [ms] 간격으로 관찰한 결과를 나타낸 사진이다. 아크는 2.1 [ms]동안 유지되었고 생성하여 최대 크기 약 10 [mm]로 커지는 데 걸리는 시간은 0.3 [ms]였고 소멸하는데 걸린 시간은 1.8 [ms]로 생성보다는 소멸되는 시간이 더 긴 것으로 나타났다. 아크의 성장속도는 소멸속도보다 빠르다는 것을 알 수 있었다. 또한 아크 소멸시 미소하게 상하로 진동하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 2차원적으로만 해석한 결과이므로 다양한 각도에서의 관찰이 요구된다. 마지막으로 아크 발생시 생기는 열 때문에 전극이 용손되는 것을 확인하였다.

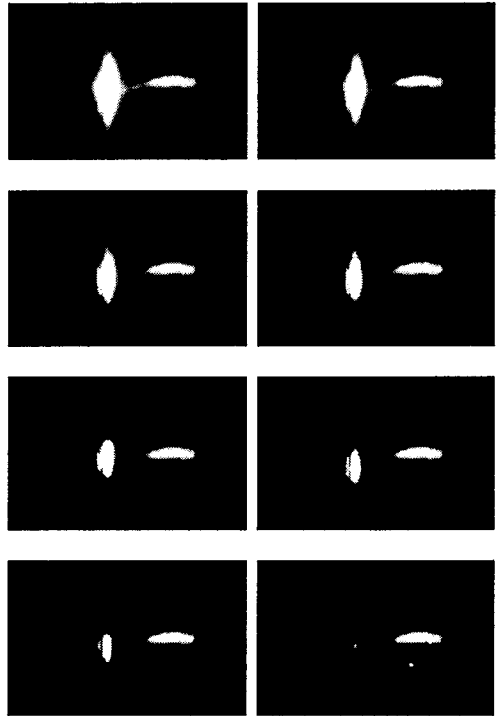
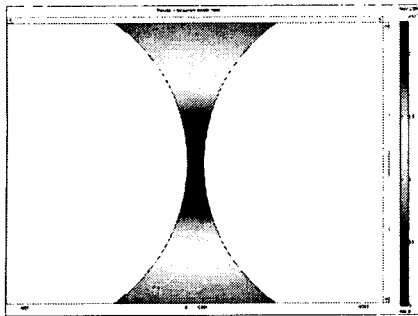


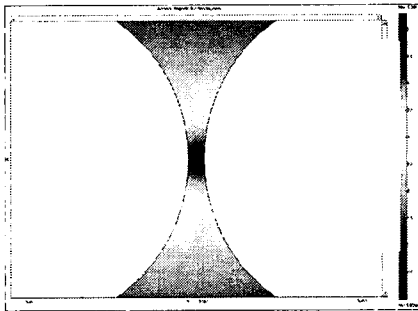
그림 2. 400 [A] 아크 성장과정

3.3 유한요소법을 이용한 분석

전류 400A 공급시 갭사이에서 일어나는 전자기적인 현상을 모의하였다. 갭간격은 0.001 [m]이고 경계조건으로 전극에 표면전류밀도를 주었다. 모의 조건에서 난류 모델이나 유동해석은 고려하지 않았다. 그림 3(a)를 보면 전류가 전극 사이의 가장 가까운 부분에서 집중되는 것을 볼 수 있다. 그리고 자계밀도는 전극 중심부 주위로 크기가 가장 큰 부분이 띠형태로 집중됨으로써 앞 절의 전자계 해석에서 언급한 $(\vec{J} \times \vec{B})$ 의 힘을 유도할 수 있음을 알 수 있다.



(a) Current density



(b) Magnetic flux density

그림 3. 유한요소법을 이용한 해석

4. 결 론

본 논문에서는 대전류 공급장치를 이용한 전류를 인가함으로써, 스위치의 개방시 발생하는 아크의 성장과정을 관찰하였다. 아크는 초기 크게 발생하여 성장하지만 그 시간은 소멸시간에 비해 아주 짧았다. 그리고 유한요소법을 이용한 분석을 통해 아크 발생시 전류와 자계의 영향을 확인하였다. 향후, 전류 크기별 아크 성장과정을 비교하고 아크 발생시 전자계 해석 뿐만아니라 유동해석과 열해석을 동시에 고려해야 할 것이다.

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 송기동 외 3, "SF₆ 아크의 절연회복특성 해석", 대한전기학회 논문지 Vol.51B, No.6, 2002
- [2] 김홍규 외 4, "아크플라즈마와 유동간의 상호작용을 고려한 열가스 유동 해석", 대한전기학회 논문지 Vol.51B, No.3, 2002
- [3] J.F. Zhang, et. al., "Theoretical investigation of a 2kA arc in a supersonic nozzle", J. Phys.D, Appl. Phys., Vol.20, pp.368-379, 1987
- [4] R.W. Liebermann and J.J. Lowke, "Radiation Emission Coefficients for Sulfur Hexafluoride Arc Plasmas", JQSRT. 16, pp.253-264
- [5] J.D. Yan, K.I. Nuttall and M.T.C. Fang, "A comparative study of turbulence models for SF₆ Arcs in a supersonic nozzle", J. Phys.21, 1988