

유한요소법을 이용한 스위칭 아크의 유동해석

정연하\*, 장태준, 송길목, 노영수, 곽희로  
 송실대학교

The Fluid Analysis of a Switching Arc using the Finite Element Method

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

**Abstract** - 본 논문에서는 스위칭 아크방전의 유동특성을 분석하기 위해서 유한요소법을 사용하여 전극 사이에서 일어나는 전계를 소스원으로 두고 열전달 및 유동 특성을 해석하였다. 그 결과 전계가 높은 곳에서 온도가 높게 나타나고 열선도 집중되는 것을 확인하였으며 전극의 형태에 따라 분포 형태가 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 개폐기의 아크 소호를 위한 기술 개발과 접점 개발 시에 기초 자료로 활용이 기대된다.

1. 서 론

고전압 분야에 있어서 아크(Arc)는 국부적으로 열을 급격히 상승시켜 주변기기에 악영향을 주는 것으로 많이 알려져 있다[1]. 따라서 아크가 한곳에 집중되어 수초정도 머무르게 되면 전극을 증발시켜 손상을 시키고 더 나아가 화재로까지 발전하는 원인이 될 수 있다. 아크에 대한 연구는 미국이나 유럽, 일본 등과 같은 선진 외국에 비해 많이 낙후된 상태이다. 아크를 전기적인 관점에서만 해석하는 것이 아닌 열적, 유동적 특성을 고려한 해석의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 아크의 유동해석을 바탕으로 차단기 등과 같은 개폐장치의 소호 기술 개발 시 활용과 접점 아크 발생 방지 기술에 따른 경제성 확보가 기대된다.

본 논문에서는 스위칭 아크방전의 유동특성을 분석하기 위해서 유한요소법을 사용하여 전계와 Navier-Stokes, 열전달의 연관성을 통해 유동 특성을 분석하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 아크의 물리적 특성

아크는 그림 1과 같이 전계와 온도에 따라 아크주, 음극영역, 양극영역으로 나눌 수 있다. 음극영역과 양극영역은 접점의 재질과 소호 매질에 관계가 깊고 아크주와 전극의 접점영역이며 전류를 이동시키는 캐리어를 아크주에 전달하는 역할을 한다. 그리고 아크주 내부의 공간 전하량은 제로이고 소호매질에 따라 다르지만 온도는 3000~25000 [K]가 된다. 대표적인 아크주의 특징으로는 중성 입자로부터 한 개 이상의 전자가 떨어져 나오도록 충분한 에너지가 공급되는 과정으로 이루어지는 이온화 특성, 반대 전하의 입자들끼리 결합함으로써 중성입자 형성하는 재결합 특성, 사하(Saha)[2]의 방정식을 이용하여 온도로 전기적 도전율을 계산할 수 있는 전기적 특성이 있다[3].

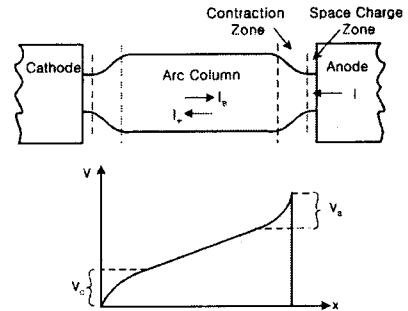


그림 1. 아크의 구분

2.2 아크 유동해석 지배 방정식

아크는 유체역학과 열역학으로 설명된다. 아크 유동 해석 시 지배 방정식은 크게 질량보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 에너지 보존 방정식으로 나눌 수가 있다.

- 1) 질량보존 방정식(연속성 방정식)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{j}) = 0$$

- 2) 운동량 보존 방정식(Navier-Stokes 식)

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \frac{4}{3} \nabla \mu (\nabla \cdot \vec{v}) - \nabla \times \mu (\nabla \times \vec{v}) + \vec{j} \times \vec{B} + \rho \cdot \vec{g}$$

- 3) 에너지 보존 방정식

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla) H - \frac{\partial p}{\partial t} - (\vec{v} \cdot \nabla p) = \nabla \cdot \frac{\lambda}{C_p} \nabla H - \nabla \cdot \vec{q}_R + \Phi + \vec{j} \cdot \vec{E}$$

3. 유한요소법을 이용한 해석

3.1 시뮬레이션에 이용된 식

아크의 유동해석을 위해서 유한요소법을 사용하였다. 이 시뮬레이션에는 총 3개의 식이 사용된다. 식 4-6은 각각 유동해석에서 중요한 운동량 보존 방정식, 정전계 방정식, 전도와 대류의 열전달 방정식을 나타낸다[4].

- 1) 유체의 흐름(Navier-Stokes)

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} - \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nabla p = F \quad (\text{식 4})$$

2) 전계 해석

$$-\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = 0 \quad (\text{식 5})$$

$$\vec{E} = -\nabla V$$

3) 열전달

$$Q = d|\vec{E}|^2$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - \rho C \vec{u} \cdot \nabla T \quad (\text{식 6})$$

본 절에서는 전계를 유동의 운동과 열전달의 소스원으로 두고 해석을 하였고 개략적인 구성도는 그림 2와 같다. 시뮬레이션 조건으로는 두 전극이 완전 열전도체이고 분위기 가스의 종류는 상온 25 [T]의 공기를 사용하였으며 각 기체의 물질적 특성에 따라 밀도와 점성계수 등을 고려하였다. 그리고 모든 경계조건은 열적으로나 전기적으로 절연이 되었다고 가정한다.

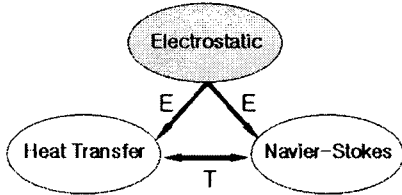
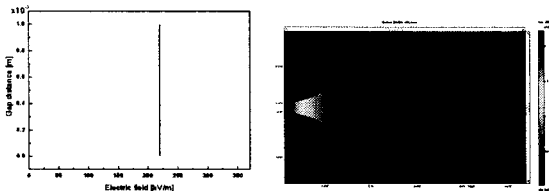


그림 2. 시뮬레이션 구성도

### 3.2 시뮬레이션 해석 결과

#### 3.2.1 구 전극의 시뮬레이션

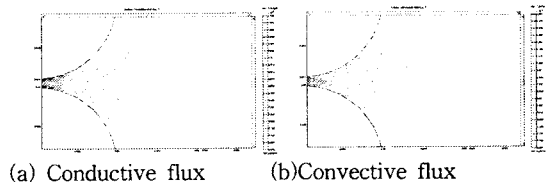
갭간 거리 0.001 [m] 일 때 교류 220 [V]를 인가하여 발생하는 전계의 세기는 그림 3(b)와 같다. 전계는 거리에 반비례하기 때문에 전극 사이의 간격이 가장 좁은 부분에서 전계가 가장 크게 나타났다. 이 전계의 세기는 유체의 열원으로 작용하여 온도 분포 변화를 일으키고 열전기력(Electrothermal force)을 형성한다. 그리고 그림 3(a)는 전극의 갭 간격인 0.001 [m]사이에서의 전계의 세기를 나타낸 그래프이다.



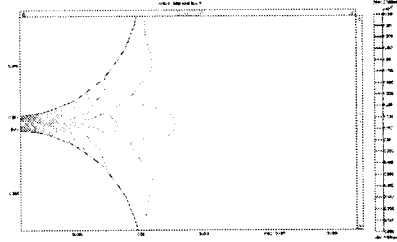
(a)갭 사이의 전계의 세기 (b)전계의 분포

그림 3. 구 전극의 전계

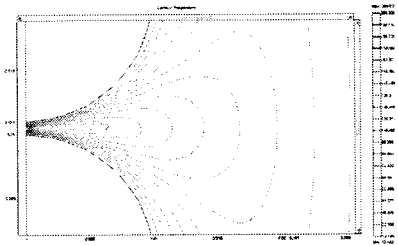
그림 4(a)와 그림 4(b)는 각각 열선(Heat flux)의 전도항(conductive)과 대류항(convective)을 나타낸다. 두 항 모두 전계가 가장 큰 전극의 중앙에서 큰 값을 가지는 것을 보고 전계의 변화가 유동의 흐름을 변화가 시킬 수 있다. 이 두 항이 합쳐져 전체적인 열선(Heat flux)의 분포를 나타내는데 그림 4(c)와 같다. 그림 4(d)는 온도의 분포를 나타낸 것이다. 전극 반경 내에서 어느 한 전극 방향으로의 치우침이 없이 긴 타원형의 분포가 형성되는 것을 볼 수 있었다.



(a) Conductive flux (b) Convective flux



(c) Total heat flux

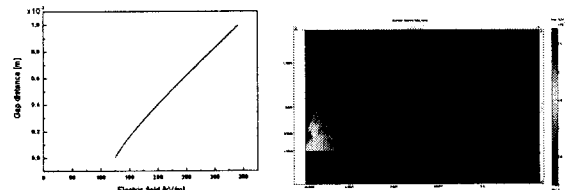


(d) 온도 분포

그림 4. 구 전극의 시뮬레이션 결과

#### 3.2.2 침 대 평판 전극의 시뮬레이션

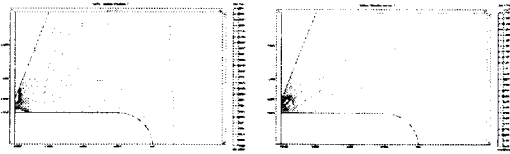
침 전극과 평판 전극 사이의 거리를 구 전극과 마찬가지로 0.001 [m]로 놓고 교류 220 [V]를 인가하여 그림 5와 같은 전계의 분포가 나타났다. 그림 5(a)는 갭 사이의 전계의 세기를 나타낸 그래프이다. 이것은 침전극의 말단 부분에 전계가 집중되는 것을 볼 수 있다. 그리고 전계의 세기는 유체의 열원으로 작용하여 온도 분포 변화를 일으키고 열전기력(Electrothermal force)을 형성한다.



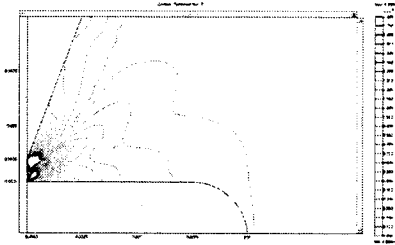
(a)갭 사이의 전계의 세기 (b)전계의 분포

그림 5. 침 대 평판 전극의 전계

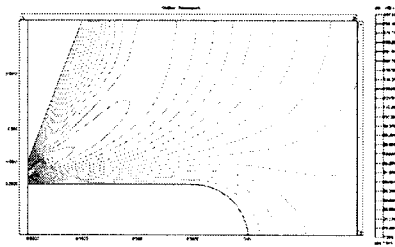
그림 6(a)와 그림 6(b)는 각각 열선(Heat flux)의 전도항(conductive)과 대류항(convective)을 나타낸다. 전도항의 경우 전극 부근에서 높게 나타났고 대류항은 두 전극 사이의 공간에서 크게 나타났다. 그리고 그림 6(c)는 전도항과 대류항이 합쳐진 전체적인 열선(Heat flux)의 분포를 나타낸다. 그림 6(d)는 온도의 분포를 나타낸 것이다. 온도는 침 전극 방향으로 기운 타원형의 분포를 나타냈고 이는 유체가 이동할 수 있는 공간의 차이로 인한 것으로 사료된다.



(a)Conductive flux      (b)Convective flux



(c)Total heat flux



(d)온도 분포

그림 6. 침 대 평판 전극의 시뮬레이션 결과

#### 4. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 전계 해석을 바탕으로 아크의 유동 특성을 분석하였다. 전계가 높은 곳에서 온도가 높게 나타나고 열선도 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 전극의 형태에 따라 분포 형태가 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 개폐기의 아크 소화를 위한 기술 개발시에 기초 자료로 활용이 기대된다.

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 이덕출, 황명환 역, "고전압 플라즈마 공학", 동일출판사, 2003
- [2] M.N. Saha, Ionisation in the solar chromosphere, Phil. Mag., 40, pp.26~37, 1920
- [3] 개폐장치설계기술 개발을 위한 대전류 아크특성에 관한 연구, 한국전기연구원, 1998
- [4] M. Sigurdson et al, "AC electrokinetics for microfluidic immunosensors", IMECE2003-41442