

SF₆ 차단기의 열가스 수치해석

배재윤, 김홍규, 정현교
서울대학교 전기공학부

Numerical Analysis of Arcs in SF₆ Gas Circuit Breaker

Chae-Yoon Bae, Hong-Kyu Kim, and Hyn-Kyo Jung
School of Electirc Eng. Seoul National Univ.

Abstract - 본 논문에서는 SF₆ 차단기 내의 대전류 아크에 대한 수치적인 해석을 모의하는 도구를 제시한다. 대전류의 차단을 위해서 해석을 통해 열적 파괴를 예측하는 것이 필수적이다. 본 논문에서 사용한 방법은 FVFLIC(finite volume fluid in cells)이며 지배방정식은 압축성 오일러 방정식으로 아크와 유동의 상호 작용을 해석한다.

아크는 기본적으로 에너지 보존식에서 열소스항으로 나타나며 주울열과 복사항으로 표현된다. 주울열은 플라즈마 영역내의 전계해석을 통해 계산되며 복사항은 방출과 흡수항의 합으로 나타내어지고 이것은 국소적인 온도와 압력의 함수이다. 본 논문에서는 수정된 방출과 흡수 모델로 복사 열전달을 계산하였다.

1. 서 론

과파 형식의 SF₆ 차단기는 효과적 차단 능력으로 계통상에 널리 쓰이고 있다. 차단기의 해석과 설계에 있어서 아크와 가스 유동의 상호 작용이 정확히 평가되어야 함은 물론이다. 이러한 정확한 평가를 위해 많은 수치해석 기법이 제시되어왔다[1-4]. 이러한 기법의기본적 틀은 유체 유동의 수치적 해석과 아크 모델링의 결합이다. 일반적으로 유동장의 기본 지배 방정식은, 점성항과 열전도를 무시한, 축대칭 오일러 방정식이다. 아크는 에너지 보존식에서 소스항으로서 고려되어지며 이것은 다시 주울열 항과 복사항으로 구성된다.

본 논문에서는 대전류 아크의 수치적 해석 도구를 제시하는데, 유동장은 FVFLIC(Finite Volume Fluid In Cell) 방법[5]으로 계산되어지며 지배방정식은 비점성 압축성 오일러 방정식이다. 아크는 에너지 보존식에서 에너지 소스항으로 표현하였으며 주울열과 복사 방출항으로 나누어 계산하였다. 주울열 항은 플라즈마 영역의 전계해석을 결과를 이용하며 복사항은 방출과 재흡수를 고려한 모델을 이용해 계산하였다.

2. 본 론

2.1 지배 방정식

차단기 내의 아크는 국소 열평형 상태 (LTE : Local Thermal Equilibrium) 상태에 있다고 가정하였다. 이 가정은 고압의 아크 플라즈마에서 실험 결과와 잘 들어맞는 것으로 알려져 있으며 이런 가정 하에서 가스 유동에 대해 질량과 운동량 그리고 에너지 보존법칙을 적용할 수 있게 된다. 또한 대전류 아크에서 영향이 작은 열전도와 점성을 무시하면 유동장에 대한 지배 방정식은 축대칭 오일러 방정식이 된다. 아래에 질량과 운동량 그리고 에너지 보존식을 차례로 나타내었다.

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

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 r)}{r \partial r} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v r)}{r \partial r} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial z} = - \frac{\partial r p}{r \partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u E r)}{r \partial r} + \frac{\partial(\rho v E)}{\partial z} = - \frac{\partial(p u r)}{r \partial r} - \frac{\partial(p v)}{\partial z} + S_e \quad (4)$$

식 (4)의 소스항인 S_e 는 유동에서의 아크의 영향을 나타낸다. 아크의 영향은 주울열과 복사로 인한 것이다. 위의 (1)~(4) 식들로부터 밀도 ρ와 비총에너지 E가 계산되어진다. 압력 P와 온도 T를 계산하기 위해서는 상태방정식이 필요한데 이상기체의 경우 상태 방정식은 아래와 같다.

$$P = (\gamma - 1) \rho i, \quad i = e - \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \quad (5)$$

그러나 고온 플라즈마의 경우 이상기체의 상태방정식이 잘 맞지 않기 때문에 본 논문에서는 [6]의 데이터를 이용해 온도와 압력을 계산하였다. [7]에서는 SF₆ 가스의 밀도와 비총에너지의 특성이 다음과 같은 함수 형태로 제시되었다.

$$\rho = \rho(P, T), \quad i = i(P, T) \quad (6)$$

ρ와 i는 오일러 방정식을 풀면 알 수 있는 값이므로 다음과 같은 형태의 함수가 필요하게 된다.

$$P = P(\rho, i), \quad T = T(\rho, i) \quad (7)$$

위의 함수는 (6)의 데이터를 보간한 값을 Newton-Raphson 방법을 통해 얻을 수 있다.

2.2. 아크 모델링

대전류가 흐르고 있을 때 전극이 열리게 되면 높은 온도의 플라즈마가 발생한다. 그 영향은 식(4)에서 S_e 항으로 나타내었다. 아크가 에너지 평형에 미치는 영향은 다시 두가지 성분으로 나눌 수 있는데 하나가 주울열에 의한 소스항이고 다른 하나는 복사에 의한 손실항이다. 따라서 다음과 같이 S_e를 표현할 수 있다.

$$S_e = S_{ohm} - U_{net} \quad (8)$$

여기서 S_{ohm} 은 주울열에 의한 소스항이고 U_{net}은 복사에 의한 손실항이다.

2.2.1 주울열

주울열에 의한 소스항을 계산하기 위해서는 아크 영역의 전류 밀도가 반드시 계산되어야 한다. 아크 영역내의 전류밀도의 분포는 전하보존법칙과 Ohm의 법칙으로부터 계산된다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (9)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (10)$$

여기서 \vec{J} 는 전류 밀도이고 σ 는 전기 전도도이며 \vec{E} 는 전계의 세기이다.

\vec{E} 를 스칼라 포텐셜의 그라디언트로 나타내면 아크 영역의 전류의 분포를 나타내는 방정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (11)$$

주울열 항은 다음 식으로 계산한다.

$$S_{Ohm} = \sigma |\vec{E}|^2 \quad (12)$$

전기 전도도 σ 는 국소적인 T와 P의 함수이며 이 값은 Frost와 Liebermann의 SF₆ 가스 데이터로부터 구할 수 있다. 실제 문제의 경우는 아크 전류는 알려져 있고 전극간의 전압차를 모르는 것이므로 전압차와 주울열 항을 찾기 위해서는 아래와 같은 방법을 사용하였다.

1) 임의로 아크 영역을 정한다. 이 영역은 그림1.에서 볼 수 있듯이 전체 아크 영역을 포함할 만큼 클 수 있으며 오른쪽 경계는 전극 안에 놓여있다.

2) 식 (11)을 유한요소법을 사용하여 푼다. 이때 경계 조건은 $\phi_a = 1(V)$, $\phi_b = 0(V)$ 로 하고 만일 전기 전도도가 0이면 $\sigma_{min} = 10^{-3}$ 을 그 요소의 전기 전도도로 가정한다.

3) 전계 \vec{E}_0 를 계산한다. 이 전계의 세기는 전압차가 1(V)일 때의 것이다.

4) 단면 S_c 를 흐르는 전류를 다음 관계식으로부터 계산한다.

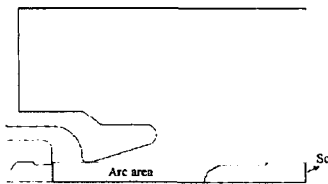
$$I_0 = \int_{S_c} \vec{J} \cdot d\vec{s} = \int_{S_c} \sigma \vec{E}_0 \cdot d\vec{s} \quad (13)$$

5) 전압과 전계를 다음 식을 통해 구한다.

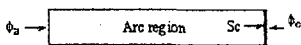
$$V = \frac{I_{arc}}{I_0} \vec{E} = V \vec{E}_0 \quad (14)$$

여기서 I_{arc} 는 알고있는 값이다.

6) 식 (12)를 사용해 주울열을 계산한다.



(a) 전류밀도 분포 계산을 위한 아크 영역의 정의



(b) 유한요소 해석을 위한 경계 조건

그림1. 아크 영역 및 유한요소 경계 조건

2.2.2 복사 열전달 모델

복사 열전달은 뜨거운 플라즈마 영역에 제한되어 있으며 차단기의 아크가 원통형에 가깝기 때문에 대부분의 아크 모델은 [7]에서 제시된 순방출계수를 사용해 복사

를 근사적으로 계산한다.

비록 순방출계수가 아크에 의한 복사를 나타내기에는 하지만 아크 경계층에서 입자들의 급속한 재결합으로 인하여, 아크 중심부에서 발생한 에너지의 흡수가 일어나므로 이 계수만으로 복사를 모델링할 수 없다.

방출과 흡수를 나타내기 위해서 결과적인 식(7)의 복사항은 다음과 같이 표현된다.

$$U_{net} = U_e - U_a \quad (16)$$

여기서 U_e 는 방출을 U_a 는 흡수를 나타낸다.

본 논문에서 복사의 방출과 흡수를 고려하기 위한 모델은 [4]에 기초하고 있으며 그림2.에서 도식적으로 나타내었다.

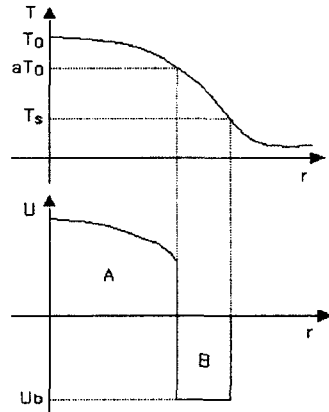


그림 2. 수정된 복사 열전달 모델

여기서 T_0 는 축상에서의 온도이고 계수 a 는 0.83 T_0 는 3000(K)이다.

온도에 따른 U_{net} 은 다음과 같다.

$$U_{net} = U(T, P, R), \quad aT_0 < T \leq T_0 \quad (17)$$

$$U_{net} = -U_b, \quad T_s < T \leq aT_0 \quad (18)$$

여기서 T 는 온도 P 는 압력 R 는 반지름이며 U_b 는 그림 2에서 정의된 것이다.

만일 1차원 모델을 사용한다면 아크 반경을 찾기가 쉽겠지만 본 논문에서는 일반적인 2차원 아크 형상을 고려하였다. 아크 영역의 임의의 지점에 대한 복사 열전달을 계산하기 위해서는 그림 1의 (b)에서 보이는 아크 영역을, 식(11)에서 계산한 전계에 따라서, 몇 개의 부영역으로 나누어야 한다. 나누어진 부영역 중의 하나를 D_j 라하면 그림2.의 영역 A에서의 총 복사 에너지는 식 (17)과 아래의 식 (19)로부터 계산할 수 있다.

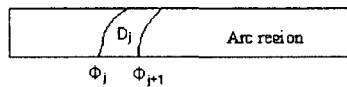


그림 3. 부영역의 정의

$$W_{Aj} = \int_{A_j} U dV \quad (19)$$

W_{Aj} 의 약 80%정도가 영역 B에서 흡수된다고 가정하면 U_b 를 아래와같이 결정할 수 있다.

$$W_{Bj} = \int_{B_j} U_b dV = U_b V_{Bj} = \beta W_{Aj} \quad (20)$$

$$U_b = \beta W_{A_i} / V_{B_i} \quad (21)$$

여기서 $\beta = 0.8$ 이고 V_{B_i} 는 부영역 D_{B_i} 의 부피이다.

2.3 모의 결과

논문에서 제시된 기법들을 파파 형식의 차단기에 적용하였다. 그림 4와 그림 5에서는 플라즈마 영역 내의 아크 전류의 분포를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 아크 반경은 전극이 이동과 아크 전류에 따라 변한다. 그림 6에서는 고온의 플라즈마 주변의 SF₆ 가스의 밀도 분포를 나타내고 있다. 부분에 따라 밀도가 1(kg/m³)이하가 되기도 한다.

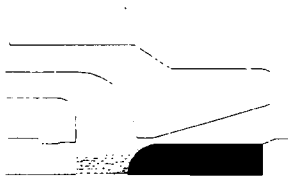


그림 4. 전극이 노즐목을 지나기 전의 전류 분포

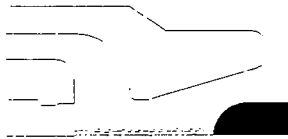


그림 5. 전극이 노즐목을 지난 후의 전류 분포

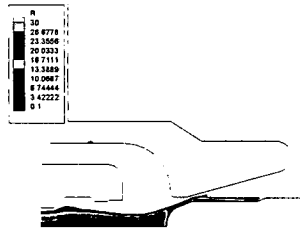


그림 6. 플라즈마 부근의 밀도 분포

3. 결 론

본 논문에서는 차단기의 대전류 아크 발생시 이를 해석하기 위한 수치적 기법을 제시하였다. 주열열과 전류 밀도 분포를 구하기 위해서 인공 아크 영역을 설정하였다. 이렇게 함으로써 아크 형상과 전류 분포에 대한 안정적인 해를 얻을 수 있었다. 방출과 흡수를 고려한 수정된 모델을 사용하여 복사 열전달을 계산하였다.

[참 고 문 헌]

[1] J.Y.Trépanier, M.Reggio, and R.Camarero, "LTE computation of axisymmetric arc-flow", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol.19, pp.580-589, Aug.1991.
 [2] H.Pellegrin, J.Y.Trépanier, R.Camarero, and X.D.Zhang, "Computation of te self-induced magnetic field in circuit-breaker arcs", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol.25, pp.974-981, Oct.1997.
 [3] J.Y.Trépanier, X.D.Zhang, H.Pellegrin, and R.

Camarero, "Application of computational fluid dynamics tools to circuit-breaker flow analysis", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.10, pp.817-820, April 1991.

[4] X.D.Zhang, J.Y.Trépanier, and R. Camarero, "Numerical Simulation of a 2kA convection-stabilized nitrogen arc using CFD tool", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.30, pp.3240-52, 1997.

[5] Y.Zhao, and D.E. Winterbone, "The finite volume Fic method and its stability analysis", *Int.J.Mesh. Sci.*, vol.37, pp.1147-60, 1995.

[6] L.S. Frost, and R.W. Liebermann, "Composition and transport properties of SF6 and their use in a simplified enthalpy flow arc model", *Proc. of the IEEE*, vol.59, pp.474-485, 1971.

[7] R.W. Liebermann, and J.J. Lowke, "Radiation emission coefficients for sulfur hexafluoride arc plasmas", *Quant. Spectrosc. Radiat., Transfer*, vol.16, pp.253-264, 1976.