

고온 고압 플라즈마 하에서의 과도상태 노즐용삭 해석 기술

이병윤, 송기동, 박경엽  
한국전기연구원

Transient State Analysis of Nozzle Ablation under High Temperature and High Pressure Plasma

B.Y. Lee, K.D. Song, K.Y. Park  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 본 논문에서는 계통에서 사고에 의해 발생한 고장전류를 차단할 때, 가스차단부에서 발생하는 고온 · 고압의 아크플라즈마 하에서 노즐용삭에 의해 PTFE와 같은 노즐 물질이 SF<sub>6</sub>가스에 혼입하는 경우에 노즐 재질이 아크플라즈마의 차단특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 요구되는 과도상태 노즐용삭 해석기술에 대하여 정리한다. 그리고 노즐용삭 해석기술을 계통에서 고장이 발생한 경우에 흐르는 고장전류를 차단하는 과정에서 발생하는 아크플라즈마에 적용하여 용삭된 PTFE의 농도를 계산하고 그 결과를 제시한다.

대한 물성치들을 PTFE의 농도에 따라 데이터베이스화 하여 계산에 활용하였다. 또한 PTFE의 농도분포를 구하기 위해 PTFE의 농도식을 기존의 열가스 유동해석 방정식에 추가하였으며 지락 또는 단락 시에 발생하는 고장전류가 흐른다는 가정 하에서 SF<sub>6</sub>가스 차단부의 노즐 형상에 대하여 과도상태의 열가스 유동해석을 수행하고 고 계산된 PTFE의 농도분포를 제시하였다.

2. 노즐용삭 해석 기술

SF<sub>6</sub> 가스를 절연 및 소호 매체로 이용하는 가스차단기는 그 구조상, 차단부내에서의 유동의 흐름은 축방향이 지배적이므로 반경방향의 유동 흐름을 무시하고 원통좌표계 (r, θ, z)를 이용하여 열가스 유동해석을 위한 지배방정식을 표현하면 다음과 같이 된다.

1. 서 론

SF<sub>6</sub>가스는 높은 절연내력특성과 우수한 아크소호특성을 보유하고 있기 때문에 고전압 가스차단기에 널리 사용되고 있다[1]. 그런데 차단기의 동작작무에 따라, 계통에서 고장이 발생하면 고장전류를 차단하는 과정에서 고온 · 고압의 아크플라즈마가 발생하게 된다. 이 때, 발생한 아크플라즈마 중심부의 온도는 25,000~30,000K에 이르며, 가스의 압력은 수십 기압에 달하기도 한다.

가스차단기 내부에서 발생하는 아크플라즈마와 관련된 물리적 현상들은 매우 복잡하여 현재까지도 모든 현상을 고려한 해석 기술은 개발되어 있지 않다. 먼저 고장전류에 의해 발생한 아크로부터 나오는 열에너지는 전도, 대류 및 복사에 의해 아크를 둘러싸고 있는 주위 가스로 전달된다. 특히, 복사에 의해 노즐 표면에 전달된 열에너지는 노즐 용삭을 일으킨다. 접점의 표면에서는 유출열과 아크에 의한 가열에 의해 접점의 재질이 증발되어 아크플라즈마 내부로 녹아 들어간다. 접점의 팁(Tip)부분에서는 전극의 Sheath효과가 발생하고, 아크전류에 의해 발생한 자계에 의해 아크자체가 Lorentz힘을 받아 아크플라즈마의 움직임에 영향을 미치게 된다. 그리고 아크플라즈마가 존재하는 경우, 유동은 난류 특성을 띄게 된다.

이와 같이, 여러 가지 물리적 현상들이 복합적으로 발생하므로 이것들을 모두 고려한 아크플라즈마 해석 기술을 개발하는 것은 매우 힘들다. 저자들은 90년대 말부터 유동해석 프로그램인 Phoenix를 이용하여 아크플라즈마를 해석하는 기술을 개발해오고 있는데, 현재까지는 위에서 열거한 현상들 가운데, 접점 재질의 증발효과와 전극의 Sheath 효과가 고려되고 있지 않다. 또한 노즐 용삭의 경우도 고려되고는 있으나, 용삭된 노즐의 물리적 특성치들이 SF<sub>6</sub> 가스와 같다고 가정하고 해석하고 있다 [2-4].

그런데 차단기의 대전류 차단성능에 용삭된 노즐 물질의 특성도 영향을 미친다는 연구결과[5]들이 다수 보고되고 있다. 따라서, 현재 용삭된 노즐 물질과 SF<sub>6</sub> 가스의 물질 특성이 같다는 가정 하에 수행하고 있는 열가스 유동해석기술에 노즐의 실제적인 물질 특성을 반영하기 위한 노즐용삭 해석기술을 추가한 열가스 유동해석 기술의 개발이 요구되고 있다. 이러한 목적으로 노즐의 재질로 많이 사용되고 있는 PTFE와 SF<sub>6</sub> 가스의 혼합물질에

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

여기서, ρ는 PTFE-SF<sub>6</sub> 혼합물질의 밀도를 나타내며 u(v,w)는 가스의 속도벡터를 나타낸다.

r 방향 운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} v) - \text{div}(\Gamma \text{grad } v) = -\frac{\partial P}{\partial r} + (\vec{j} \times \vec{B})_r \quad (2)$$

여기서 v는 반경방향의 가스의 속도, Γ=μ<sub>r</sub>+μ<sub>t</sub>이고,  $\vec{j}$ 는 전류밀도벡터,  $\vec{B}$ 는 자속밀도를 나타내는 벡터이며, P는 압력이다. μ<sub>r</sub>과 μ<sub>t</sub>는 각각 가스의 층류 점성도 및 난류 점성도를 나타낸다.

z 방향 운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} w) - \text{div}(\Gamma \text{grad } w) = -\frac{\partial P}{\partial z} + (\vec{j} \times \vec{B})_z \quad (3)$$

여기서 w는 축방향의 가스의 속도, Γ=μ<sub>r</sub>+μ<sub>t</sub>이고,  $\vec{j}$ 는 전류밀도벡터,  $\vec{B}$ 는 자속밀도를 나타내는 벡터이며, P는 압력이다. μ<sub>r</sub>과 μ<sub>t</sub>는 각각 가스의 층류 점성도 및 난류 점성도를 나타낸다.

에너지 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} h) - \text{div}(\Gamma_h \text{grad } h) = \frac{dP}{dt} + \sigma E^2 - q + \Phi \quad (4)$$

여기서 h는 엔탈피, Γ<sub>h</sub>=(k<sub>r</sub>+k<sub>t</sub>)/C<sub>p</sub>, q는 방사에 의한 에너지, σE<sup>2</sup>은 Ohmic Heating으로 σ는 가스의 전기전도도, E는 전계의 세기이다. 또한 Φ는 층류와 난류 점성도에 의한 에너지 소산량을 나타내지만 그 영향이 미미하여 실제 계산에서는 무시되었다. k<sub>r</sub>과 k<sub>t</sub>는 각각 가스의 층류 열전도도 및 난류 열전도도를 나타낸다.

**PTFE 농도 방정식**

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \text{div}(\rho u C) - \text{div}(\Gamma_C \text{grad } C) = 0 \quad (5)$$

여기에서 C는 PTFE의 농도,  $\Gamma_C = \rho(D_i + D_d)$ 을 각각 나타내며,  $D_i$ 은 혼합물질의 증류확산계수를,  $D_d$ 는 난류확산계수를 각각 나타낸다. 난류확산계수  $D_d$ 는 난류점성도  $\mu_t$ 와 다음의 관계에 있다.

$$D_i = \frac{\mu_t}{\rho S c_i} \quad (6)$$

여기에서  $S c_i$ 는 Schmidt수로 그 값이 대개 1.0 근처라고 보고 되어 있어 본 논문에서는 이 값으로 1.0을 사용하였다.

열가스 유동해석과 관련된 전자계해석, 방사에 의한 에너지전달 모델링, 난류모델에 대하여는 기존의 논문에서 이미 자세하게 다루었기 때문에 발표된 논문을 참조하기 바라며, 여기에서는 노즐용삭 해석기술과 관련된 농도계산에 대하여만 언급하기로 하였다.

PTFE의 농도계산을 위한 경계조건은 다음과 같이 설정해 주었다. 먼저 노즐 표면에 대하여 살펴보자. 노즐의 용삭의 경우, 노즐에 도달한 방사에너지의 90%가 PTFE 물질을 용삭시키는데 이용된다고 가정하였다. 노즐 용삭에 의한 노즐 직경의 변화는 매우 작기 때문에 노즐 용삭에 의한 노즐 구조의 변화는 무시하였다. 노즐 표면에서의 PTFE 증기의 Mass Flux(단위면적당 단위시간당 질량)  $M_f$ 는 다음과 같이 구했다.

$$M_f = \frac{R_f}{H_{PTFE}} \quad (7)$$

여기에서,  $R_f$ 는 노즐 표면에서 용삭에 이용된 Radiation Flux를 나타내고,  $H_{PTFE}$ 는 PTFE를 1kg 증발시키는데 필요한 유효 증발에너지로  $1.1 \times 10^7 \text{ J/kg}$ 로 설정하였다.

PTFE 증기는 노즐 표면에서 수직으로 흘러나와 대류와 확산을 통해 열가스 유동 속으로 침투해 간다. 이 때 노즐에 바로 인접한 격자 속에는 PTFE의 농도가 지배적이다. PTFE 증기의 유입에 따른 운동량은 국부 압력에 의해 계산하여 노즐에 바로 인접한 격자에 고려해 주었다. 노즐의 상류장축 경계에서는 순수한 SF<sub>6</sub>가스가 흘러들어오므로 PTFE 증기의 농도를 0.0으로 설정했으며 하류장축 경계에서는 Neumann조건을 설정하였다.

일단 PTFE 증기의 농도가 계산되면 농도에 따라 온도, 압력, 밀도, 전기전도도, 열전도도, 마하수 등의 각종 물질 특성치들을 평가하여 열가스 유동해석을 실시하였다.

**3. 과도상태 노즐용삭 해석 사례**

본 논문에서 소개한 과도상태 노즐용삭 해석 기술을 그림 1에 보인 것과 같은 파괴식 SF<sub>6</sub> 가스차단부에 적용해 보았다.

SF<sub>6</sub>가스의 초기 충전 압력은 0.6 [MPa], SF<sub>6</sub>가스의 초기 온도 300[K]로 설정하였다. 고장전류는 피크치가  $0.9 \times \sqrt{2} \times 63000 \text{ [A]}$ 인 정현파이고 아킹 타임은 약 12 [ms]로 가정하였다. 피스톤의 스트로크 곡선은 측정된 것을 이용하였으며, 최대 스트로크는 250 [mm]이다.

열가스 유동은 자체해석을 수행하여 구한 Lorentz Force가 아크에 미치는 영향을 운동량보존방정식에서, 아크전류에 의한 유열효과 복사에 의한 열손실을 에너지보존방정식에서 각각 고려하여 해석하였고, SF<sub>6</sub>-PTFE의 혼합 물질의 농도계산을 실시하여 노즐 용삭에 의한

영향도 고려하였다. 난류모델로는 Prandtl Mixing Length모델을 이용하였으며 난류상수 값으로는 0.1을 적용하였다.

그림 1에는 고장전류가 흐르고 있다고 가정하여 노즐 용삭 해석기술과 열가스 유동해석 기술을 이용하여 아크플라즈마를 해석한 결과로부터 구한 아크플라즈마의 온도분포를 시간의 경과에 따라 도시한 것이다. 아크플라즈마의 최대온도는 중심부에서 발생하고 있으며 약 25000[K]임을 알 수 있었다.

그림 2에는 고장전류가 흐르고 있다고 가정하여 노즐 용삭 해석기술과 열가스 유동해석 기술을 이용하여 아크플라즈마를 해석한 결과로부터 구한 아크플라즈마의 농도분포를 도시한 것이다. 그림 2로부터 PTFE의 농도가 대체로 90%를 상회하는 것을 알 수 있다. 따라서 PTFE 증기가 SF<sub>6</sub> 가스차단기의 차단성능에도 크게 영향을 미칠 것으로 사료된다.

**4. 결 론**

본 논문에서는 계통에서 고장이 발생하여 기기의 보호를 위해 SF<sub>6</sub> 가스차단기를 이용하여 고장전류를 차단할 때 발생하는 아크플라즈마와 관련된 물리적 현상 중에서 노즐용삭에 의해 발생하는 PTFE 농도계산에 대하여 살펴보았다. 기존의 열가스 유동해석에서는 용삭에 의해 발생한 PTFE의 물리적 특성치들이 SF<sub>6</sub> 가스와 같다고 가정하고 해석하였으나 본 논문에서는 SF<sub>6</sub>-PTFE의 혼합 물질의 특성치를 데이터베이스화 하여 실질적인 혼합 물질의 물리적 특성을 고려할 수 있게 되었다.

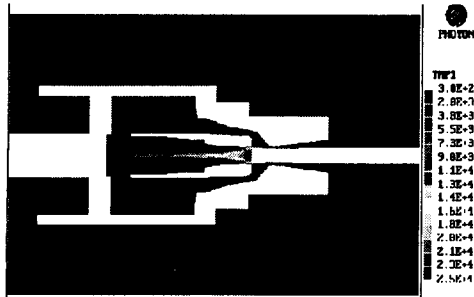
그리고 기존의 열가스 유동해석 방정식에 PTFE의 농도계산을 위한 농도계산식을 추가한 열가스 유동해석 기술을 소개하고, 이것을 실제로 고장전류가 흐른다는 가정 하에서 SF<sub>6</sub> 가스차단기의 차단부에 대하여 과도상태 열가스 유동해석에 적용하여 보았다. 그 결과 과도상태 하에서의 PTFE의 농도분포를 얻을 수 있었다.

PTFE의 농도계산에 의한 SF<sub>6</sub>-PTFE의 혼합 물질의 특성을 고려할 수 있게 됨으로써 기존의 열가스 유동해석 기술을 보다 개선시킬 수 있는 계기를 마련하게 되었다.

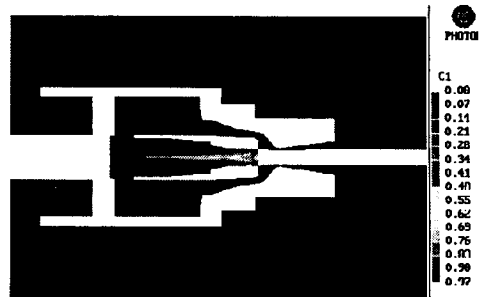
향후, PTFE의 농도계산기법을 고장전류를 차단하는 과정에서의 과도상태 해석에 활발히 적용하여 노즐용삭에 의한 SF<sub>6</sub>-PTFE의 물질 특성을 반영한 SF<sub>6</sub> 가스차단기의 RRRV(Rate of Rise of Recovery Voltage) 해석에 대한 연구를 지속적으로 수행해야 할 것으로 사료된다.

**[참 고 문 헌]**

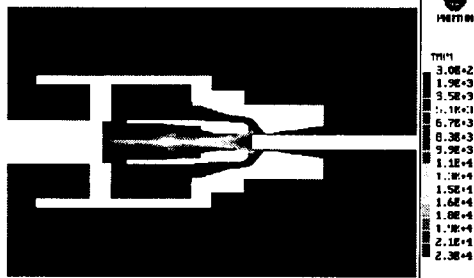
[1] H.M. Ryan & G.R. Jones, "SF<sub>6</sub> Switchgear", Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom, 1989  
 [2] 이병윤, 송기동, 박경엽, "초고압 가스차단부의 유부하 압력 상승계산", 대한전기학회 전기기기연구회 합동춘계학술대회 논문집, 1999, pp.52-54  
 [3] 이병윤, 송기동, 박경엽, "초고압 가스차단부의 아크해석", 방진/플라즈마 춘계학술대회, 2000, pp.64-67  
 [4] 이병윤, 송기동, 박경엽, 신영준, "복합소호방식 가스차단기의 대전류 차단특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 국제연구기관 특별 Session 논문집, 2000, pp. 37-40  
 [5] J.D. Yan, J.L.Zhang, A.B. Murphy, W.B.Hall, M.T.C. Fang, "Arc Behavior in the Mixture of SF<sub>6</sub> and PTFE Vapour in an AUTO-EXPANSION Circuit Breaker", Proceedings of the XIII International Conference on Gas Discharges and their Applications, 2000, pp.58-61



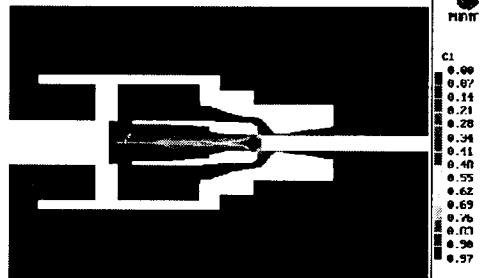
(a)  $t = 0.7$  ms,  $I = 72$  kA



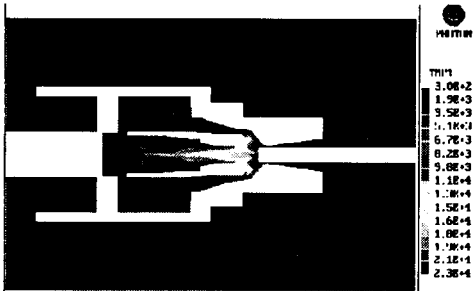
(a)  $t = 0.7$  ms,  $I = 72$  kA



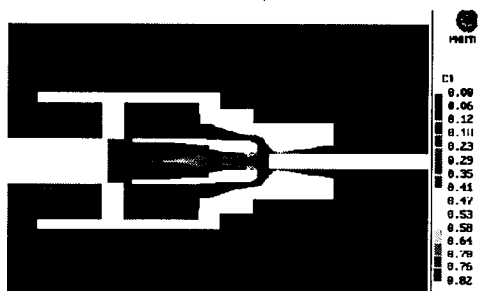
(b)  $t = 1.71$  ms,  $I = 54$  kA



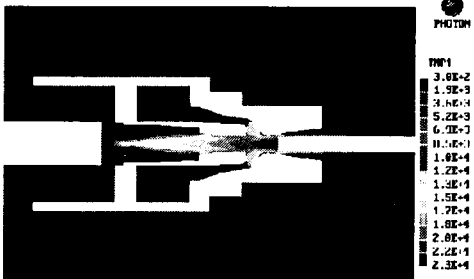
(b)  $t = 1.71$  ms,  $I = 54$  kA



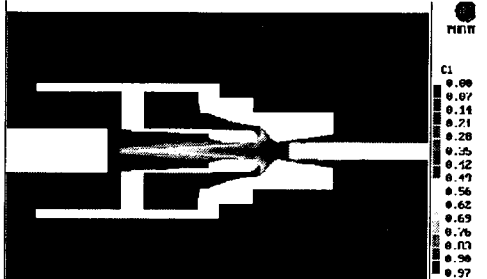
(c)  $t = 3.23$  ms,  $I = 13$  kA



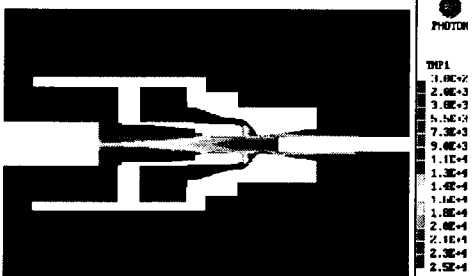
(c)  $t = 3.23$  ms,  $I = 13$  kA



(d)  $t = 6.76$  ms,  $I = 74$  kA

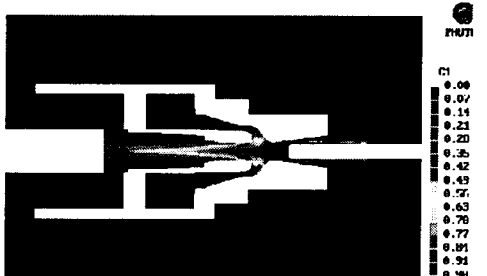


(d)  $t = 6.76$  ms,  $I = 74$  kA



(e)  $t = 7.77$  ms,  $I = 80$  kA

그림 1. PTFE 온도분포도



(e)  $t = 7.77$  ms,  $I = 80$  kA

그림 2. PTFE 농도분포도