

노즐용사를 고려한 노즐모델의 정상상태 열가스 유동해석

이병윤, 송기동, 박경엽
한국전기연구소

Steady State Hot Gas Flow Analysis for Nozzle Model Considering Nozzle Ab

B.Y. Lee, K.D. Song, K.Y. Park
KERI

Abstract - This paper describes a method for steady state hot gas flow analysis considering nozzle ablation for the nozzle of SF₆ gas circuit breaker. In order to take account of the effect of ablated nozzle material on the hot gas flow, the PTFE mass concentration equation is added to the established equations for hot gas flow analysis. The steady state simulations were carried out under the condition of DC current flows and the results are presented.

1. 서 론

계통에서 근거리 선로고장 또는 단자단락고장[1-4] 등으로 큰 고장전류가 흐르는 경우 SF₆ 가스 차단기를 이용하여 차단할 때 발생하는 아크의 물리적 현상은 매우 복잡하다. 대표적인 것들로는 전도, 대류 및 복사에 의한 열의 전달과 노즐용삭, 난류 특성, 집점의 팁(Tip)부분에서의 전극의 Sheath효과, 아크전류에 의해 발생하는 자계에 의해 아크자체가 영향을 받는 Lorentz힘 등을 들 수 있다. 이 가운데 현재까지는 전도, 대류 및 복사에 의한 열의 전달과, 난류 특성, 아크전류에 의해 발생하는 자계에 의해 아크자체가 영향을 받는 Lorentz힘을 고려하여 열가스 유동해석을 시도하고 있다. 물론 현재도 노즐 용삭을 고려하고는 있으나, 용삭된 노즐의 물리적 특성치들이 SF6 가스와 같다고 가정하고 해석하고 있다 [5-7].

그런데 차단기의 대전류 차단성능에 용삭된 노즐 물질의 특성도 영향을 미친다는 연구결과[8]들이 다수 보고되고 있으므로 현재 용삭된 노즐 물질과 SF6 가스의 물질 특성이 같다는 가정 하에 수행하고 있는 열가스 유동해석기술을 보다 개선시키기 위해 노즐의 실제적인 물질 특성을 반영하여 열가스 유동해석을 수행하고자 한다. 이러한 목적으로 노즐의 재질로 많이 사용되고 있는 PTFE와 SF6 가스의 혼합물질에 대한 물성치들을 PTFE의 농도에 따라 데이터베이스와 하여 계산에 활용하였다.

또한 PTFE의 농도분포를 구하기 위해 PTFE의 농도식을 기존의 열가스 유동해석 방정식에 추가하였으며 직류전류가 흐른다는 가정 하에서 SF6가스 차단부의 노즐 형상에 대하여 정상상태의 열가스 유동해석을 수행하였다. 열가스 유동해석은 상용 CFD 프로그램인 Phoenix를 이용하여 수행하였다.

2. PTFE 농도계산을 포함한 열가스 유동해석

차단부내에서의 유동은 축방향으로의 흐름이 지배적이므로 원주방향의 유동 흐름을 무시하고 원통좌표계 (r, θ, z)를 이용하여 열가스 유동해석을 위한 지배방정식을 표현하면 다음과 같이 된다.

. 연속방정식

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

여기서, ρ는 PTFE-SF6 혼합물질의 밀도를 나타내며 u(v,w)는 속도벡터를 나타낸다.

. r 방향 운동량 보존 방정식

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

. z 방향 운동량 보존 방정식

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

위의 두 운동량 보존 방정식에서 $\Gamma = \mu + \alpha$, \mathbf{j} 는 전류밀도벡터, \mathbf{B} 는 자속밀도를 나타내는 벡터량이며, P는 압력이다.

. 에너지 보존 방정식

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

여기에서 h는 엔탈피, $\Gamma_h = (k + k_r)/c_p$, q는 방사에 의한 에너지, σE^2 은 Ohmic Heating으로 σ는 가스의 전기 전도도, E는 전기장의 세기이다. 또한 \mathbf{A} 는 층류와 난류 점성도에 의한 에너지 소산량이다.

. PTFE 농도 방정식

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

여기에서 C는 PTFE의 농도, $\Gamma_C = \rho(D_1 + D_2)$ 각각 나타내며, D₁은 혼합물질의 층류확산계수를, D₂는 난류확산계수를 각각 나타낸다.

난류확산계수 D₂는 난류점성도 μ와 다음의 관계에 있다.

$$D_2 = \frac{\mu_t}{\rho Sc_t}$$

여기에서 Sc_t는 Schmidt수로 그 값이 대개 1.0 근처라고 보고되고 있어 본 논문에서는 이 값으로 1.0을 사용하였다.

열가스 유동해석과 관련한 전자기해석, 방사에 의한 에너지전달 모델링, 난류모델에 대하여는 기존의 논문에서 이미 자세하게 다루었기 때문에 발표된 논문[5-7]을 참조하기 바라며, 여기에서는 농도계산과 관련해서만 언급하기로 하겠다.

PTFE의 농도계산을 위한 경계조건은 다음과 같이 설정

정해 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_j 는 다음과 같이 구했다.

$$M_j = \frac{R_f}{H_{PTFE}}$$

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

PTFE 증기는 노즐 표면에서 수직으로 흘러나와 대류와 확산을 통해 열가스 유동 속으로 침투해 간다. 이 때 노즐에 바로 인접한 격자속에는 PTFE의 농도가 지배적이다. PTFE 증기의 유입에 따른 운동량은 국부 압력에 의해 계산하여 노즐에 바로 인접한 격자에 고려해 주었다. 노즐의 상류장측 경계에서는 순수한 SF6가스가 흘러들어오므로 농도를 0으로 설정했으며 하류장측 경계에서는 Neumann조건을 설정하였다.

일단 농도가 계산되면 농도에 따라 각종 물질 특성치들을 평가하였으며 열가스 유동해석을 실시하였다.

3. 적용 사례

본 논문에서 소개한 열가스 유동해석 기술을 그림 1에 보인 것과 같은 노즐 모델에 대하여 적용해 보았다. 노즐의 길이는 34.8mm이고 상류장 전극의 직경은 10mm, 상류장 전극 Tip부분의 직경은 4.8mm이다. 또한 하류장 전극의 직경은 6mm, 하류장 전극의 Tip부분의 직경은 4mm이고, 입력부의 노즐 직경은 36mm, 출력부의 노즐 직경은 16mm이다. 두 전극은 고정되어 있으며 전류는 2000A 직류전류가 흐른다고 가정하였다. 입력부에서의 경계조건으로는 압력 0.9MPa의 Stagation 상태를 가정하였고 출력부에서의 압력조건은 0.3MPa로 가정하였다. 격자수는 축방으로 82개, 반경방향으로 162개를 사용하여 해석영역을 분할하였다.

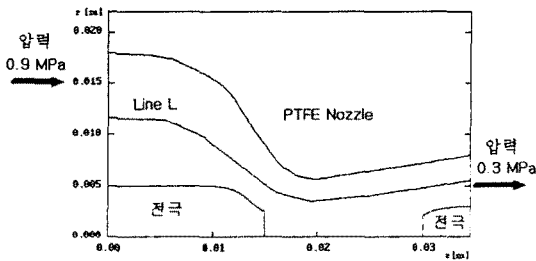


그림 1. 차단부의 노즐형상

열가스 유동은 자체해석을 수행하여 구한 Lorentz Force가 아크에 미치는 영향을 운동량보존방정식에서, 아크전류에 의한 증발열과 복사에 의한 열손실을 에너지보존방정식에서 각각 고려하여 해석하였고, SF6-PTFE의 혼합 물질의 농도계산을 실시하여 노즐 용삭에 의한 영향도 고려하였다. 난류모델로는 Prandtl Mixing Length모델을 이용하였으며 난류상수값으로는 0.195를 적용하였다.

그림 2는 직류 전류 2000[A]가 흐를 때의 정상상태에서의 전위분포를 도시한 것으로 이로부터 아크전압이

약 191 [V]임을 알 수 있다. 그림 3에는 이때의 대칭 축상 및 그림 1의 Line상에서의 압력분포를 도시한 것으로 대칭축 부근에서 전기에너지의 주입에 의해 가스가 가열되어 압력이 상승한 것을 볼 수 있다. 하류장 전극 앞부분에서 압력이 상승하는 것은 가스가 하류장 전극에 부딪혀 속도가 감소하면서 밀도가 상대적으로 증가하기 때문이다. 그림 4는 대칭 축상 및 그림 1의 Line상에서의 속도분포를 도시한 것이다. 대칭축 상에서의 마하수의 최대치는 약 0.55이었으며 가스의 출구부에서는 마하수가 약 1.21 정도로 초음속류를 형성하였다. 그림 5에는 정상상태에서의 온도분포를 도시한 것으로 최대온도는 약 23000[K]임을 알 수 있었다. 마지막으로 그림 6은 농도계산으로부터 구한 PTFE의 정상상태에서의 농도분포를 도시한 것이다.

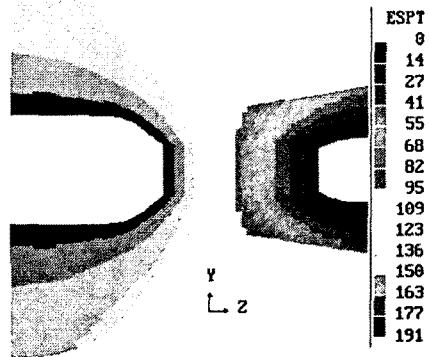


그림 2. 전위분포도 (직류 전류 2000 [A])

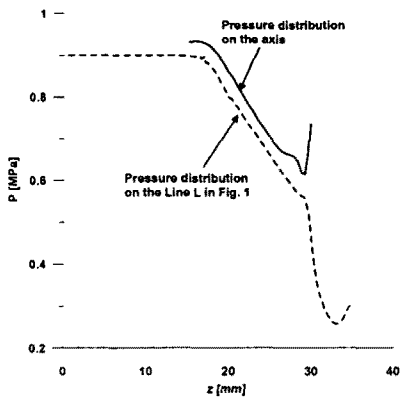


그림 3. 축상 및 그림 1의 Line L상에서의 압력 분포

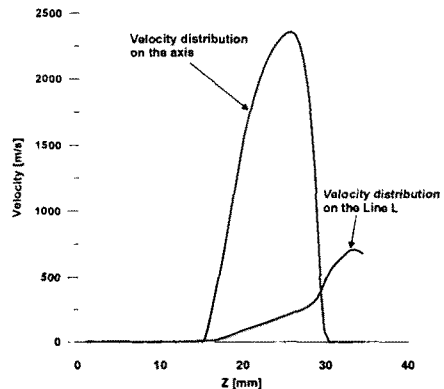


그림 4. 축상 및 그림 1의 Line L상에서의 속도 분포

(참 고 문 헌)

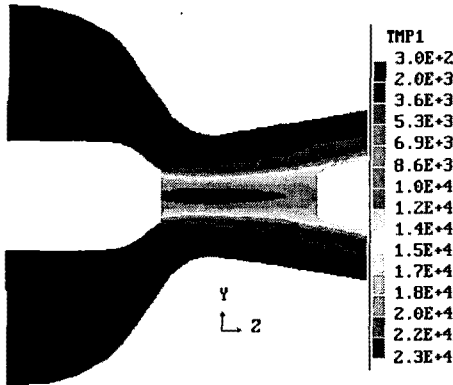


그림 5. 온도분포도 (직류 전류 2000 [A])

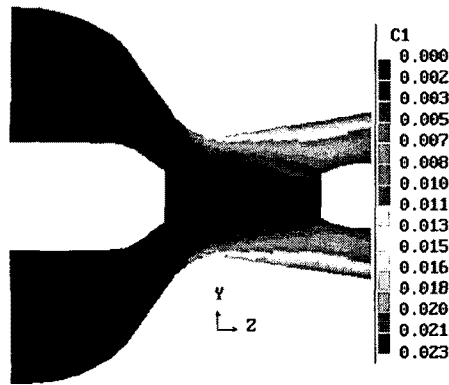


그림 6. PTFE 농도분포도 (직류 전류 2000 [A])

4. 결 론

본 논문에서는 계통에서 고장이 발생하여 기기의 보호를 위해 SF₆ 가스차단기를 이용하여 고장전류를 차단할 때 발생하는 아크현상 중에서 노즐용삭에 의해 발생하는 PTFE 농도계산에 대하여 살펴보았다. 기존의 열가스 유동해석에서는 용삭에 의해 발생한 PTFE의 물리적 특성치들이 SF₆ 가스와 같다고 가정하고 해석하였으나 본 논문에서는 SF₆-PTFE의 혼합 물질의 특성치를 데이터베이스와 하여 실질적인 혼합물질의 물리적 특성을 고려할 수 있게 되었다.

그리고 기존의 열가스 유동해석 방정식에 PTFE의 농도계산을 위한 농도계산식을 추가한 열가스 유동해석 기술을 소개하고, 이것을 직류 전류가 흐른다는 가정 하에서 SF₆ 가스차단기의 노즐모델에 대하여 정상상태 열가스 유동해석에 적용하여 보았다. 그 결과 정상상태 하에서의 PTFE의 농도분포를 얻을 수 있었다.

PTFE의 농도계산에 의한 SF₆-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 과도상태에 적용하여 노즐용삭에 의한 SF₆-PTFE의 물질 특성이 열가스 유동 특성 및 SF₆ 가스차단기의 RRRV(Rate of Rise of Recovery Voltage)에 어떻게 영향을 미치는 가에 대한 연구를 지속적으로 수행해야 할 것으로 사료된다.

- [1] "가스遮断器のユニット大容量化への要求とその基本技術", 일본전기학회기술보고, 제497호
- [2] M. Sakaki와 3인, "GIS의遮断性能技術", 明電時報, 通卷232号, 1993, No.5, pp.13-24
- [3] "大容量遮断器の特殊遮断條件", 일본전기학회기술보고,(II부) 제388호
- [4] K. Ragaller, "Current Interruption in High-Voltage Networks", 1978, Plenum Press, New York, pp.29-65
- [5] 이병운, 송기동, 박경엽, "초고압 가스차단부의 유부하 압력상승계산", 대한전기학회 전기기기연구회 합동춘계학술대회 논문집, 1999, pp.52-54
- [6] 이병운, 송기동, 박경엽, "초고압 가스차단부의 아크해석", 방진/플라즈마 춘계학술대회, 2000, pp.64-67
- [7] 이병운, 송기동, 박경엽, 신영준, "복합소호방식 가스차단기의 대전류 차단특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 국제연구기관 특별 Session 논문집, 2000, pp. 37-40
- [8] J.D. Yan, J.L.Zhang, A.B. Murphy, W.B.Hall, M.T.C. Fang, "Arc Behavior in the Mixture of SF₆ 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