

PTFE 노즐로부터 발생하는 용삭가스를 고려한 스위칭 아크 해석

이원호*, 김홍규**, 이종철*
 강릉원주대*, 한국전기연구원**

Numerical Analysis of Switching Arcs with the Ablation of PTFE Nozzles

Won-Ho Lee*, Hong-Kyu**, Jong-Chul Lee*
 Gangneung-Wonju National University*, Korea Electrotechnology Research Institute**

Abstract - The high-voltage circuit breaker plays an important role in the electrical system because there has been a need for suitable switching devices capable of initiating and interrupting the flow of the electric fault current. It continues as the contacts recede from each other and as the newly created gap is bridged by a plasma. The arc plasma happens inside the insulation nozzle of SF6 self-blast interrupter which is newly developed as the next-generation switching principle. The ablation of PTFE nozzle is caused by this high temperature medium, the PTFE vapor from the nozzle surfaces flows toward the outlets and the pressure chamber. The vapor makes the pressure of the chamber increased by heat and mass transfer from the arcing zone. Because the rate of ablation depends on the magnitude of applied current, it decreases when the current goes to zero. The compressed gas inside the chamber flows reversely toward the arc plasma during this moment. According to this principle, the arc can be cooled down and the fault current can be interrupted successfully. In this study, we calculate arc plasmas and thermal-flow characteristics caused by fault current interruption inside a SF6 self-blast interrupter, and to investigate the effect of PTFE ablation on the whole arcing history.

〈표 1〉 CFD-아크모델에 사용된 지배방정식

Navier-Stokes Eq.		Electrostatic potential & Electric field		Magnetic field
$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{\Gamma} \phi) - \nabla \cdot (\Gamma_s \nabla \phi) = S_\phi$		$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0$ $E = -\nabla \varphi$		$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\theta) = \mu_0 j_z$
Equation	Φ	Γ_ϕ	S_ϕ	
Mass	1	0	0	
z-momentum	w	$\mu_t + \mu_l$	$-\partial p / \partial z + (J \times B)_z + \text{viscous terms}$	
r-momentum	v	$\mu_t + \mu_l$	$-\partial p / \partial r + (J \times B)_r + \text{viscous terms}$	
Enthalpy	h	$(k_t + k_l) / c_p$	$dp / dt + \sigma E^2 - q + \text{viscous dissipation}$	
PTFE concentration	C_{PTFE}	$\rho(D_t + D_r)$	0	
Cu concentration	C_{Cu}	$\rho(D_t + D_r)$	0	

1. 서 론

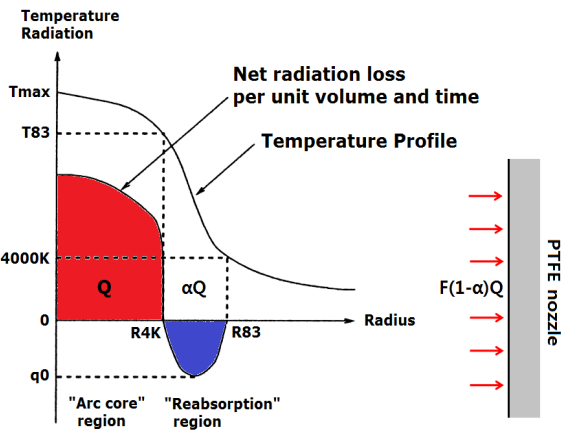
고전압 가스차단기(high-voltage gas circuit breaker)는 단락 전류 조건하에서도 작동이 가능하기 때문에 전력 시스템에서 중요한 안전 장치이다. 차단기가 작동할 때 차단기 접점 사이에 아크(electric arc)가 형성된다 [1]. 가장 새로운 세대의 고전압 차단기인 SF6-자력소호 차단기에서 아크는 절연 노즐 안에서 발생된다 [2]. 아크의 높은 온도는 노즐 재료의 용삭(ablation)을 일으키며, 이에 따라 배출구(outlet)와 압력 챔버 방향으로 용삭가스의 흐름이 발생한다 [3]. 이 용삭가스의 흐름은 압력 챔버 내부의 압력 상승을 일으킨다. 전류영점(current zero) 부근에서는 절연 노즐 안으로의 에너지 투입이 감소되므로 노즐 재료의 용삭도 줄어든다. 압력 챔버 안에 저장된 용삭가스는 이 시점에서 용삭가스가 들어온 반대 방향인 배출구 영역 방향의 아크를 향해 흐르게 된다. 이러한 원리에 따라 강력한 가스 흐름이 아크를 냉각시키고 고장전류는 성공적으로 차단된다. 본 연구에서는 CFD 해석을 통하여 노즐 용삭량과 압력 챔버의 압력상승 사이의 관계를 검토하고, 이에 따른 전류영점 부근에서

의 접점 사이의 아크온도 및 열유동 특성을 파악하였다.

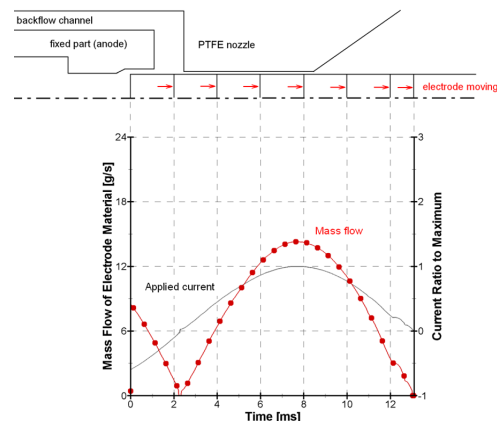
2. 본 론

CFD 해석은 Patankar-Spalding method에 기반을 둔 상용 CFD 코드인 PHOENICS [4]를 사용하였으며, 아크모델은 Fortran으로 프로그래밍하여 양방향 연계가 가능한 User-subroutines을 구성하고, Maxwell's eqs.에 따른 전자기장 계산에 필요한 변수들이 CFD main solver에서 효율적으로 계산될 수 있도록 알고리즘을 개선하였다. 표 1에 계산에 사용된 지배방정식 및 변수를 나타내었다.

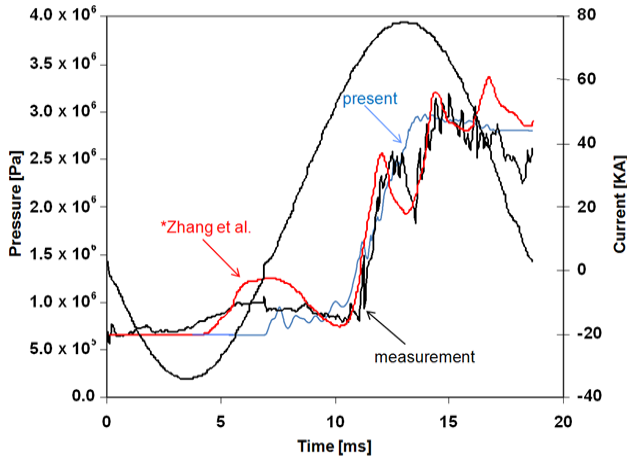
대전류 구간 CFD-아크모델의 주요과제 중 하나인 25,000K 이상의 고온 아크 플라즈마에 의한 복사 열전달은 그림 1과 같이 Liebermann and Lowke [5]에 의해 정의된 순 방출계수 (net emission coefficient)를 이용한 간이방사모델 (approximate radiation model)을 사용하였고, 이에 따른 PTFE 노즐에서의 용삭현상은 Zhang et al. [6] 모델을 사용하였다. 가스차단기의 전류 차단과정에서의 열전달 현상은 적용된 난류모델



〈그림 1〉 CFD-아크모델에 사용된 간이방사모델 및 용삭모델의 개략도



〈그림 2〉 접점이동위치에 따른 입력전류와 용손량



〈그림 3〉 복합소호 팽창실 압력상승 비교

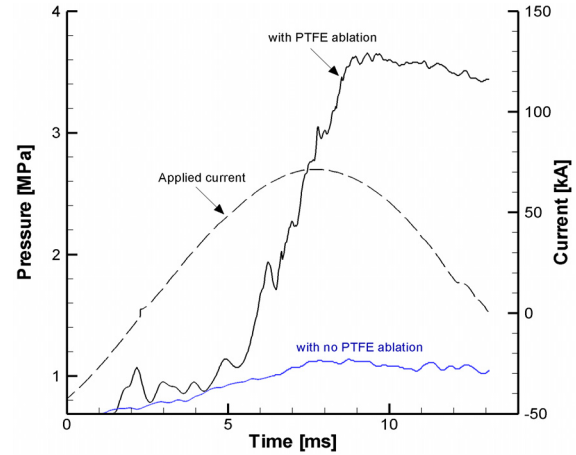
에 크게 좌우되며, 대전류 구간에서의 아크이력 (arc history) 및 전류영점 구간에서의 차단특성 예측의 신뢰성을 높이기 위해서 스위칭 아크에 적합하게 수정된 프란틀 혼합거리 난류모델 [6]을 적용하여 계산하였다. 복합소호 챔버에 대한 대전류 구간의 CFD-아크모델 해석방법으로 계산한 결과를 검증하기 위하여 Zhang et al. 해석모델 [6]에 대하여 그림 2와 같은 입력조건에 따른 계산을 수행하여 압력 결과를 그림 3에 비교하였으며, 차단부 형상을 100% 정확히 동일하게 구현하지 못했음에도 불구하고 본 연구를 통한 해석결과가 정성적으로 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

열과피식 차단부에서 대전류 구간동안 발생하는 팽창실의 압력상승은 전류영점 구간에 접점 사이 존재하는 잔류아크의 소호 특성을 좌우하는 가장 큰 변수이며, 이러한 팽창실 압력을 상승시키는 주요 메커니즘은 접점 사이 발생된 고온 아크 플라즈마에 의해 가열된 주변의 SF₆ 가스 및 PTFE노즐에서 발생된 용삭가스가 팽창실로의 유입에 의한 열 및 물질 전달 (heat and mass transfer)인 것을 그림 4를 통해 확인할 수 있었다.

그림 5와 같이 용삭모델 유무에 따른 전류영점 부근에서의 온도분포를 비교한 결과, 용삭모델을 고려하지 않은 경우 대전류 구간동안의 압력상승으로 인한 소호력이 작기 때문에 잔류아크 반경이 크고 온도분포가 충분히 냉각되지 않아 접점 사이의 전기전도도가 커지므로 전류영점 후 절연회복구간에서 다시 아크가 재발호 (restrike) 또는 재점호 (reignition)되는 원인으로 작용한다. 반면에 용삭모델을 고려한 경우에는 용삭현상에 의하여 전체차단과정에서 축적된 팽창실 압력상승이 전류영점 부근에서 소호력으로 작용하는 것을 극명하게 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 CFD-아크모델 해석방법에 PTFE 용삭모델을 적용한 전산해석을 수행하였으며, 용삭모델 적용 유무에 따라 전류영점 부근에서의 접점간 잔류아크 반경 및 온도분포 차이가 극명한 것을 확인하였고, 이는 접점 사이에 존재하는 열가스를 배출구 밖으로 배출시키는 힘의 차이가 존재하여 용삭현상을 고려하지 않은 경우에는 접점 위에



〈그림 4〉 용삭모델 유무에 따른 팽창실 압력상승 비교

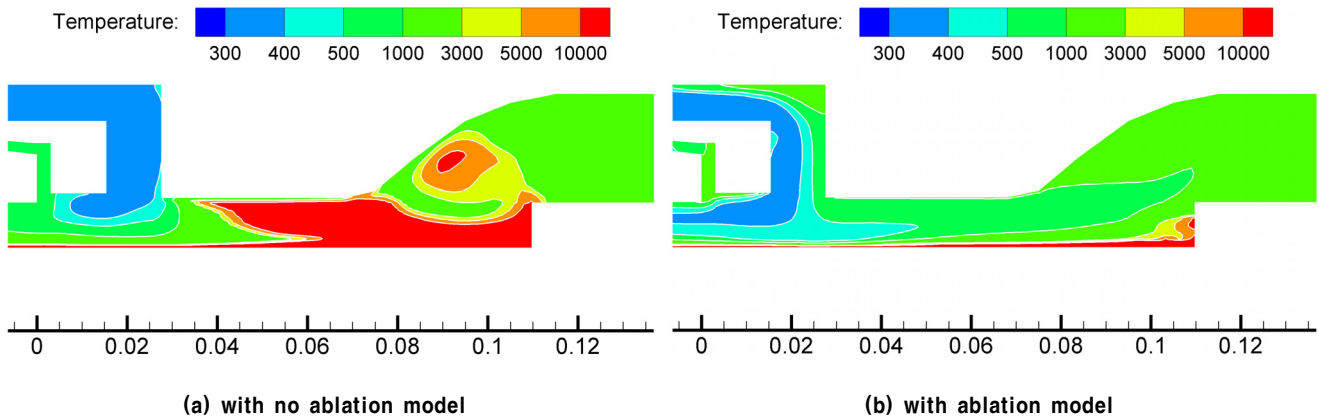
열점 (hot spot)이 형성되어 있는 것임을 해석결과를 통하여 확인하였다. 이는 PTFE 노즐용삭으로 인하여 전체차단과정에서 축적된 팽창실 압력상승이 전류영점 부근에서 소호력으로 작용하는 열과피형 챔버의 소호 메커니즘을 명확하게 해주는 결과이다. 하지만 열과피식 가스차단기에서 발생하는 아크 플라즈마 및 이에 의한 PTFE 용삭가스에 관한 정량적·체계적 연구결과가 발표되어진 바가 없으며, 이에 대한 검토 및 실험데이터와의 비교를 통한 최적의 용삭모델 개발을 지속적으로 진행할 것이다.

[후 기]

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 2009101030001A)

[참 고 문 헌]

- [1] Garzon, R. D., High voltage circuit breakers: Design and applications 2nd, Marcel Dekker, New York, 2002
- [2] Schavemaker, P., Digital testing of high-voltage SF6 circuit breakers, Dissertation, Delft University of Technology, 2002
- [3] 가스차단기의 차단기술동향, 日本電氣學會技術報告, 제993호, 2005
- [4] CHAM, PHOENICS. PHOENICS is commercially available from CHAM Ltd., London, UK
- [5] Liebermann, R.W. and Lowke, J.J., "Radiation Emission Coefficient for Sulphur HexaFluoride," JQSRT, Vol.17, p.253-264, 1976
- [6] Zhang, J. L., Yan, J. D., Murphy, A. B., Hall, W. and Fang, M. T. C., "Computational Investigation of Arc Behavior in an Auto-expansion on Circuit Breaker Contaminated by Ablated Nozzle Vapor", IEEE Transactions on Plasma Sci., Vol. 30, No. 2, pp. 706-719, 2002



〈그림 5〉 용삭모델 유무에 따른 전류영점 부근에서의 온도분포 비교