

SF₆ 가스차단기에서 아크플라즈마에 의한 비정상 유동특성

이종철*, 안희섭*, 오일성*, 김윤제**
 *LG산전(주) 전력연구소, **성균관대학교 기계공학부

The Characteristics of Unsteady Flow for Arc Plasma in a SF₆ GCB

Jong C. Lee, Heui-Sub Ahn, Il-Sung Oh and Youn J. Kim
 Electrotechnology R&D Center, LG Industrial Systems and SungKyunKwan Univ.

Abstract - 가스차단기의 성능은 노즐재질, 접점분리 속도, 차단기의 치수 그리고 아크시간 등에 좌우되며, 이러한 일련의 현상을 고찰하기 위한 유동현상을 모의하기 위해서는 기본적으로 두 접점의 상대운동 및 접점 사이에서 발생하는 아크 플라즈마(arc plasma)에 의한 전도, 대류, 복사현상 뿐만 아니라 아크전류에 의한 로렌츠힘(Lorentz's force), 용삭(ablation)에 의한 화학작용 등과 같은 매우 복잡한 물리적 현상을 고려해야 한다. 본 연구에서는 차단과정 중 대전류 영역에서의 아크특성과 아크에서 방출되는 강한 복사에너지에 의해 발생하는 PTFE 증기에 의한 영향을 고려하기 위해서 상용 CFD 프로그램인 PHOENICS에 아크 모델링과 고온에서의 SF₆-PTFE 혼합가스의 물성치 대입을 위한 보조 프로그램을 작성하여 해석을 수행하였다.

1. 서 론

컴퓨터 기술과 수치기법의 발달로 인하여 공학분야는 물론 과학 분야에서도 유용한 도구로 인정되고 있는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 시대의 흐름에 맞추어 더욱 복잡한 현상 및 형상을 다루어야 하는 전기, 전자기기 분야에서도 활발한 연구 수단으로 이용되고 있다. 그 중 전력기기 분야에서의 유동해석은 가스차단기의 개발, 성능개선 및 검증에 있어 전자계해석과 더불어 매우 중요하며, 시간 및 비용적인 측면에서 매우 큰 부담이 되는 합성시험설비구축 및 외국 인지기관에서 규격시험을 최소화하기 위하여 활발한 연구를 진행하고 있다.

가스차단기 내부의 유동현상을 모의하기 위해서는 기본적으로 두 접점의 상대운동 및 접점 사이에서 발생하는 아크 플라즈마(arc plasma)에 의한 전도, 대류, 복사현상 뿐만 아니라 아크전류에 의한 로렌츠힘(Lorentz's force), 용삭(ablation)에 의한 화학작용 등과 같은 매우 복잡한 물리적 현상을 고려해야 한다. 이러한 해석결과가 신뢰성을 가져야만 이를 통한 제품의 성능특성을 평가할 수 있기 때문에 ABB, SIEMENS, ALSTOM과 같은 해외 선진업체들은 그 중요성을 인식하여 적극적으로 해석기술 및 성능특성 평가기술을 개발하고 있다[1,2,3]. 국내에서는 90년대 말부터 본격적인 연구를 시작하였으며, 유한요소법, FLIC법, 유한체적법 등의 수치기법에 아크 모델링을 결합하여 프로그램을 개발하고 있다[4,5,6].

계통에서 사고가 발생하여 정격전류보다 매우 큰 고장 전류가 흐르는 경우 회로를 보호하기 위하여 차단기가 동작하며 고장전류를 차단하게 되는데, 이 때 차단기의 두 전극 사이에는 개극과 동시에 아크가 발생하고 전류 차단시점에서 소멸한다. 이러한 과정은 아크 초기화 단계, 대전류 영역, 전류영점 영역, 그리고 전류영점후 영역으로 분류할 수 있다. 이 중 차단기의 성능특성을 평가하기 위해서는 아크의 복사에너지 및 용삭에 의한 PTFE 증기의 영향이 큰 대전류 영역에서의 아크특성을 원활히 구현해야 전류영점 영역에서의 온도분포로부터

신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 대전류 영역에서의 아크특성과 아크에서 방출되는 강한 복사에너지에 의해 발생하는 PTFE 증기에 의한 영향을 고려하기 위해서 상용 CFD 프로그램인 PHOENICS에 아크 모델링과 고온에서의 SF₆-PTFE 혼합가스의 물성치 대입을 위한 보조 프로그램을 작성하여 해석을 수행하였다. 그 결과 차단기 소호부 챔버의 압력은 상승되며, 전류영점에서 아크를 소호할 수 있는 유동상태를 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

해석에 사용된 소호부의 단면도를 Fig. 1에 나타내었다. 차단부 내에서 발생하는 아크를 포함한 압축성 유동을 해석하기 위하여 국부적으로 열역학적 평형상태(Local Thermodynamic Equilibrium, LTE)를 가정하였으며, 계산에 사용된 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식을 일반적인 보존형 Navier-Stokes 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{V}) - \nabla \cdot (\Gamma_\phi\nabla\phi) = S_\phi \quad (1)$$

여기서 Γ_ϕ 는 변수 ϕ 에 대한 유효확산계수이며, S_ϕ 는 생성항을 나타내고 있다. 각 유동변수에 따른 유효확산계수와 생성항은 Table 1에 요약하였다. w 는 축방향 속도성분, v 는 반경방향 속도성분, h 는 엔탈피 그리고 c_m 은 PTFE의 농도를 나타낸다. 차단기 내의 가스유동은 대개 축방향 성분이 지배적이며, 유동에 미치는 중력은 무시할 수 있다. 각 식들의 생성항 S_w , S_v , S_h 은 참고문헌을 참고하기 바란다[7].

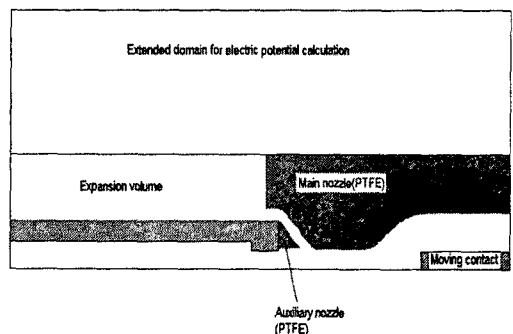


Fig. 1 Schematic diagram of the interrupter.

Table 1. Meaning of ϕ , Γ_ϕ , and S_ϕ for governing equations.

Equation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Axial mom.	w	$\mu_l + \mu_t$	S_w
Radial mom.	v	$\mu_l + \mu_t$	S_v
Energy	h	$\frac{k_l + k_t}{c_p}$	S_h
PTFE mass concentration	c_m	$\rho(D_l + D_t)$	0

SF₆-PTFE 혼합가스의 열역학적 물성치와 전기전도도를 온도, 압력 그리고 PTFE 증기 농도의 함수로 테이블화 하였다. 농도, 압력 그리고 온도구배에 의한 확산을 각각 설명하는 농도, 압력 그리고 열적 확산계수를 모두 합쳐서 PTFE 증기의 총류 확산(D_t)을 계산하는데 사용하였다. PTFE의 난류확산계수(D_l)는 난류점성과 관련있다[7].

$$D_t = \frac{\mu_t}{\rho Sc_t} \quad (2)$$

여기서 Sc_t 는 난류 Schmidt수로 1.0으로 설정하였다.

2.2 아크모델링

전류의 차단과정에서 발생한 아크의 복사에 의한 열전달 메커니즘을 Fig. 2에 나타내었다. 아크 플라즈마 내에서의 복사 열전달을 계산하는데 많은 어려운 문제들이 있으나, 차단기 내에서 발생하는 아크는 거의 실린더 형상이기 때문에 Liebermann과 Lowke에 의해 계산된 순방출계수(net emission coefficient)를 이용하고 있다. 특히 SF₆-PTFE의 순방출계수(q)는 알려지지 않고 있지만 Chervy[8] 등은 0.1[MPa] SF₆-CF₄와 SF₆-C₂F₆ 혼합에 대한 순방출계수는 18,000[K] 이상에서 SF₆와 거의 동일하다고 하였다. 아크 컬럼에서의 혼합 가스 온도는 대전류 영역에서 18,000[K] 이상이다. 그리고 전류영점에서는 거의 순수 SF₆ 가스만이 된다. 따라서 본 연구에서는 그림과 같이 반경방향의 온도분포를 이용하여 방출 및 재흡수되는 구간을 온도에 따라서 설정하여 에너지를 계산하는 순수 SF₆ 가스에 대한 간이 방사모델(approximate radiation model)을 사용하였다. 이 모델에 따르면 고온 상태의 아크 중심부로부터 방출된 에너지의 일부가 흡수층에서 흡수되고 나머지가 차단기 벽면에 도달하게 된다.

2.3 전자계해석

전류의 차단과정 중에 가스를 통해 흐르는 전류에 의해 가스공간에 열이 발생한다. 이 열원은 주열원으로 표현되어 에너지방정식에 포함되어 있으며, 이것을 구하기 위해서는 전계분포를 해석해야 한다. 차단부내에서의 전위분포를 나타내는 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (6)$$

여기서 ϕ 는 전위차를 나타내며, 경계조건으로는 양극과 음극부분에는 Dirichlet 조건을, 그 외에는 Neumann 조건을 설정하였다.

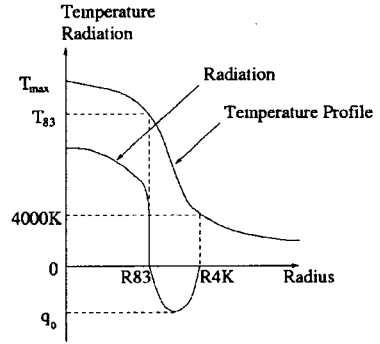


Fig. 2 Schematic diagram of approximate radiation model.

또한 자체는 로렌츠힘을 작용시켜 유동에 영향을 미치게 되는데, 이것은 운동량방정식에 ($\vec{j} \times \vec{B}$)항으로 포함되어 있다. 아크전류에 의해 유도된 자체는 아크의 축대칭 특성으로 인해 원주방향의 성분만을 갖게 된다. 따라서 아크의 투자율이 일정하다고 가정하면 자체는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$B = \frac{\mu_0 \int_0^r J_z 2\pi \xi d\xi}{2\pi r} \quad (7)$$

여기서 J_z 는 전류밀도의 축방향 성분이며, $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ 관계로부터 구할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 제품개발에 앞선 선형연구로서 실제제품이 갖추어 있지 않은 관계로 참고문헌[7]에 나와있는 열팽창(auto-expansion) 차단방식과 유사한 형태의 소호부를 이상설계(ideal design)하여 수치계산에 적용하였다. 아크시간은 13[ms]이고, 최대전류 70[kA], 초기 충전압력 7[atm], 점점 이동속도 8[m/s]로 설정하였다. 투명전극(transparent contact)은 중공(hollow)접점에서 전류를 모으는데 사용된다. 아크초기화를 위하여 축에서 최대 20,000[K]를 가지며 반경방향으로 선형적으로 감소한다고 하였다.

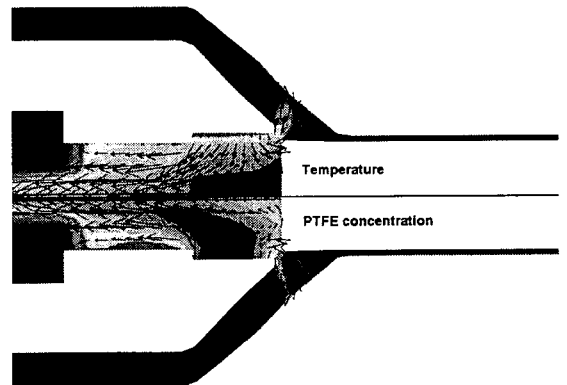


Fig. 3 Distribution of temperature and mass concentration of PTFE vapor just after opening between auxiliary nozzle and moving contact.

Figure 3에서 볼 수 있듯이 보조노즐이 접점에 의해 폐쇄되어 있는 동안에는 좌측 출구로만 유동이 나다가 순간적으로 보조노즐과 접점사이의 유로가 생기면 그 사이에서 발생된 PTFE 증기는 기존의 유출방향 이외에 소호부 챔버로 향하는 흐름을 갖으며, 추가되는 질량만큼의 소호부 압력을 상승시킨다.

접점이 이동하여 주노즐부에 들어서게 되면(Fig. 4), 아크는 거의 순 PTFE에서 발생한다. 이것이 노즐부에서의 고압부를 형성시켜 고온의 PTFE 증기는 소호 챔버로 이동하게 되고 소호부의 압력도 상승하게 된다. 소호부 압력의 상승은 이동접점이 주노즐부를 완전히 빠져나와 오른쪽 유출구 방향의 충분한 유로를 만들 수 있을 때까지 지속된다.

Figure 5는 대전류 영역 계산에 대한 최소 전류치로 설정한 4,000[A]에서의 온도와 속도벡터를 나타내고 있다. 대전류 영역에서는 접점 사이의 강한 아크의 복사 에너지와 노즐표면에서 용삭된 PTFE 증기의 질량 플럭스가 챔버 내로 유입되어 소호부의 압력을 상승시키므로, 아크의 에너지가 상대적으로 작아지는 전류영점 부근에서는 기존의 방향과는 반대의 유동형상이 발생하게 된다. 즉, 소호부에서 접점사이로의 흐름이 나타나게 되어 차단기가 전류영점에서 아크를 소호할 수 있는 능력을 얻게 된다. 이후의 온도분포는 차단기 성능평가에 상당히 중요한 척도이다. 더욱이 전류영점 부근 발생하는 아크는 대전류 영역과는 다른 특성을 가지므로 아크모델의 재설정 등이 필요하다.

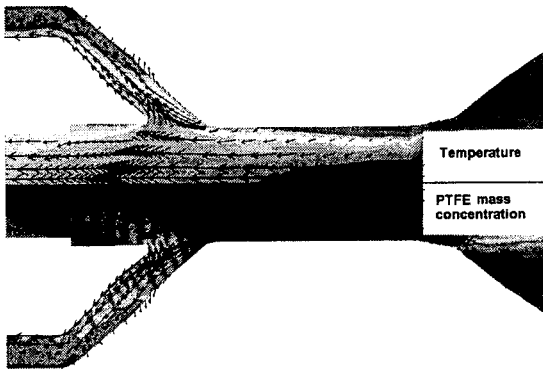


Fig. 4 Distribution of temperature and mass concentration of PTFE vapor near peak instantaneous current.

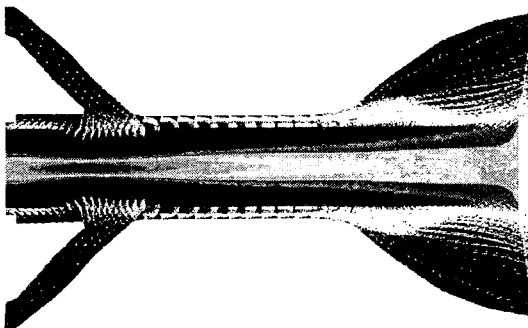


Fig. 5 Temperature and Velocity vector near current zero.

4. 결 론

이상까지 PTFE 노즐의 용삭을 포함하여 전체적인 영향을 반영한 열팽창식 차단기 내부의 아크플라즈마에 의한 비정상 유동특성을 정리한 본 논문에서의 결론은 다음과 같다.

- 1) 대전류 영역에서 발생하는 소호 챔버의 압력상승은 차단기 소호능력을 좌우하며, 그 중 대부분은 용삭된 PTFE 증기가 소호부로 유입되기 때문이다. 따라서 이를 고려할 수 있는 PTFE의 농도를 계산하여 그에 따른 물성치를 추가해 주는 것이 필요하다.
- 2) 전류영점 부근에 대한 해석은 전류값이 급격히 작아져 반경방향의 온도 기울기 변화가 매우 크므로 보다 정밀한 계산이 요구된다. 아크가 소호된 이후에도 접점 사이에는 수 천도의 뜨거운 가스가 분포하고 있어 이러한 열가스 분포를 파악하는 것은 열적특성 및 절연특성을 파악하는데 매우 중요하다.
- 3) 이외에 유동해석 결과를 실제 차단기의 성능평가에 활용하기 위해서는 전류영점 이후 극간에 걸리는 과도회복전압 상승률에 따른 post-arc 전류를 계산해야 하는 등 아직 많은 수정 및 보완해야 할 부분들이 많이 남아있다. 수치기법과 함께 물리적 현상을 뒷받침할 수 있는 실험적 연구도 병행되어야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Seeger, M., Claessens, M., Nordborg, H., Steffens, A., "Dielectric Recovery of Axially Blown Arcs in Synthetic Air in HV Circuit Breakers", Proc. of the XIV Int. Conf. on Gas Discharges and Their Applications, Liverpool, UK Vol. 1, pp. 107-110, 2002.
- [2] Andre, G., "Computation of the Moving Magnetically Driven Arcs Between Divergent Runners", Proc. of the XIV Int. Conf. on Gas Discharges and Their Applications, Liverpool, UK Vol. 1, pp. 55-58, 2002.
- [3] Robin-Jouan, P., Kairouani, N., "Numerical and Experimental Analysis of the Propagation of Hot Arc Plasma in High Voltage Circuit-Breakers", Proc. of the XIV Int. Conf. on Gas Discharges and Their Applications, Liverpool, UK Vol. 1, pp. 103-106, 2002.
- [4] Kim, H. K., Lee, B. Y., Park, K. Y., Lee, J. Y., Jung, H. K., "Numerical Analysis of Hot Gas Flow in SF₆ GCB Using the Method of Partial Characteristics and FVFLIC Method", Proc. of the XIV Int. Conf. on Gas Discharges and Their Applications, Liverpool, UK Vol. 1, pp. 75-78, 2002.
- [5] Bae, C. Y., Lee, J. Y., Jung, H. K., "Numerical Analysis of Arc-Flow Interaction in SF₆ Gas Circuit Breaker", Proc. of the XIV Int. Conf. on Gas Discharges and Their Applications, Liverpool, UK Vol. 1, pp. 71-74, 2002.
- [6] Lee, J. C., Ahn, H. S., Choi, J., Oh, I. S., Kim, Y. J., "Application of CFD-CAD Integration Technique for a GCB Design", Proc. of the XIV Int. Conf. on Gas Discharges and Their Applications, Liverpool, UK Vol. 2, pp. 276-279, 2002.
- [7] Zhang, J. L., Yan, J. D., Murphy, A. B., Hall, W., Fang, M. T. C., "Computational Investigation of Arc Behaviour in an Auto-Expansion Circuit Breaker Contaminated by Ablated Nozzle Vapour", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 30, No. 2, pp. 706-719, 2002.
- [8] Chervy, B., Riad, H., Gleizes, A., "Calculation of the Interruption Capability of SF₆-CF₄ and SF₆-C₂F₆ Mixtures-Part I: Plasma Properties, IEEE Trans. on Plasma Science, vol. 24, pp., 198-217, 1996.