

SF6 아크플라즈마 해석을 위한 프로그램 개발

이종철, 안희섭, 최종용, 김영근, 오일성
LG산전(주) 전력연구소

Development of Analysis Program for SF6 Arc Plasma

Jong C. Lee, Heui-Sub Ahn, Jongung Choi, Young-Geun Kim, Il-Sung Oh
Electrotechnology R&D Center, LG Industrial Systems

Abstract - Because there is a strong interaction between the arc discharge and their surroundings, it is not easy to predict the characteristics of industrial arc plasma systems such as gas circuit breakers. The design procedure of these systems is still largely based on trial and error, although the situation is rapidly improving because of the available computational power at a cost in which is still coming down. The desire to predict the behavior of arc plasma systems, thus optimizing and reducing the development cost, has been the motivation of these arc researchers. In this paper, we have simulated the switching operation of a gas circuit breaker during high current area using a computational fluid dynamics considered the electric field analysis, the radiation model and the effects of turbulence.

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[1]. 그 중 전력기기 분야에서의 유동해석은 가스차단기의 개발, 성능개선 및 검증에 위하여 전자계해석과 더불어 매우 중요하며[2], 시간 및 비용적인 측면에서 매우 큰 부담이 되는 합성시험설비구축 및 외국 인증기관에서의 규격시험을 최소화하기 위하여 활발한 연구를 진행하고 있다.

가스차단기 내부의 유동현상을 모의하기 위해서는 기본적으로 두 점점의 상대운동 및 점점 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. 국내에서는 90년대 말부터 본격적인 연구를 시작하였으며, 유한요소법, FLIC법, 유한체적법 등의 수치기법에 아크 모델링을 결합하여 프로그램을 개발하고 있다.

계통에서 사고가 발생하여 정격전류보다 매우 큰 고장 전류를 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 단

계, 대전류 영역, 전류영점 영역, 그리고 전류영점후 영역으로 분류할 수 있다. 이 중 차단기의 성능특성을 평가하기 위해서는 대전류 영역에서의 아크특성을 원할히 구현해야 전류영점 영역에서의 온도분포로부터 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 대전류 영역에서의 아크특성을 계산하기 위해서 상용 CFD 프로그램인 PHOENICS에 아크 모델링과 고온에서의 SF₆ 가스의 물성치 대입을 위한 보조 프로그램을 작성하여 해석을 수행하였다.

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)를 가정하였으며, 계산에 사용될 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 그리고 난류운동에너지 k, 난류운동에너지 소산율 ε에 대한 방정식을 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. w는 축방향 속도성분, v는 반경방향 속도성분, h는 엔탈피를 나타낸다. 차단기 내의 가스유동은 대개 축방향 성분이 지배적이며, 유동에 미치는 중력은 무시할 수 있다. 각 식들의 생성항 S_w , S_v , S_h 는 다음과 같으며, 전자기력, 난류, 복사, 주열의 영향을 고려한 것이다.

$$S_w = -\frac{\partial P}{\partial z} + (\vec{j} \times \vec{B})_z + viscous\ terms \quad (2)$$

$$S_v = -\frac{\partial P}{\partial r} + (\vec{j} \times \vec{B})_r + viscous\ terms \quad (3)$$

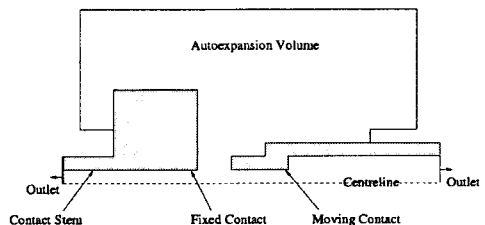


Fig. 1 Schematic diagram of the interrupter.

Table 1. Meaning of ϕ , Γ_ϕ , and S_ϕ in the momentum and enthalpy equations.

Equation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Axial mom.	w	$\mu_t + \mu_l$	S_w
Radial mom.	v	$\mu_t + \mu_l$	S_v
Energy	h	$\frac{k_t + k_l}{c_p}$	S_h
Kinetic energy	k	$\mu_t + \frac{\mu_l}{\sigma_k}$	$\rho(P_k - \epsilon)$
Dissipation rate	ϵ	$\mu_t + \frac{\mu_l}{\sigma_\epsilon}$	$\rho \frac{\epsilon}{k} (c_{1\epsilon} P_k - c_{2\epsilon} \epsilon)$

$$S_v = -\frac{\partial P}{\partial r} + (\vec{J} \times \vec{B})_r + \text{viscous terms} \quad (3)$$

$$S_h = \frac{dp}{dt} + \sigma E^2 + q + \text{dissipation terms} \quad (4)$$

여기서 \vec{J} 는 전류밀도벡터, \vec{B} 는 자속밀도벡터를 나타내는 벡터량이다. 특히 $(\vec{J} \times \vec{B})_r$ 는 자기장에 의해 받는 힘(Lorentz's force)를 나타내며, σ 는 SF₆ 가스의 전기 전도도, E는 전기장의 세기를 나타내므로 σE^2 는 아크 전류로 인해 발생하는 주울열(Ohmic heating)이다. 점성항과 소산항을 나타내는 것은 참고문헌을 참고하기 바란다. 그리고 q는 아크에 의한 복사에너지 손실을 나타내며, 생성률 P_k , 동점성계수 ν_t , 난류모델상수들은 다음과 같다.

$$P_k = \rho \nu_k \left[2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92$$

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. 본 연구에서는 그림과 같이 반경방향의 온도분포를 이용하여 방출 및 재흡수되는 구간을 온도에 따라서 설정하여 에너지를 계산하는 Zhang 등[3]에 의해 개발된 간이방사모델(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 주울열로 표현되어 에너지방정식에 포함되어 있으며, 이것을 구하기 위해서는 전기분포를 해석해야 한다. 차단부내에서의 전위분포를 나타내는 방정식을 정리하면 다음과 같다.

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

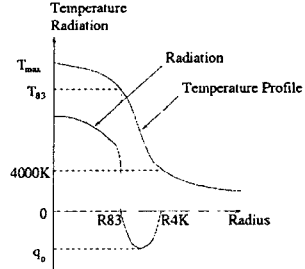


Fig. 2 Schematic diagram of approximate radiation model.

여기서 ϕ 는 전위차를 나타내며, 경계조건으로는 양극과 음극부분에는 Dirichlet 조건을, 그 외에는 Neuman 조건을 설정한다.

또한 자계는 로렌츠힘을 작용시켜 유동에 영향을 미치게 되는데, 이것은 운동량방정식에 $(\vec{J} \times \vec{B})$ 항으로 포함되어 있다. 아크전류에 의해 유도된 자계는 아크의 축칭 특성으로 인해 원주방향의 성분만을 갖게 된다. 따라서 아크의 투각율이 일정하다고 가정하면 자계는 다음식을 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

해석에 사용한 아크전류는 최대값 10[kA], 주파수 50[Hz]의 정현파 교류이며, 아크 시간은 10[ms]이다. 아크는 접점이 분리되는 순간부터 발생하지만, 모의상의 문제로 Fig. 3과 같이 접점이 분리된 후, 어느 정도 접점을 더 이동시킨 후에 아크가 발생하는 것으로 가정하였다. 초기 아크 온도 분포는 축에서 최대 20,000[K]를 가지며 반경방향으로 선형적으로 감소한다고 하였다. 아크 초기화가 완료되는 시점부터 아크에너지에 의해 유로와 챔버 내부는 가열되기 시작하고 압력이 상승한다. 정현파인 전류가 5[kA], 10[kA], 5[kA], 0.2[kA]인 각각 2.5[ms], 5[ms], 7.5[ms], 10[ms]에서의 속도벡터와 온도분포를 Figs. 4~7에 나타내었다. 챔버 내 가스가 가열되기 시작하는 2.5[ms]에서는 아크에 의한 에너지가 챔버 내로 유입되어 압력상승을 유발하며, 전류가 최고치인 5[ms]에서는 아크에 의해 가열된 열가스가 고정접점의 반경 길이만큼 확장되어 있음을 볼 수 있다.

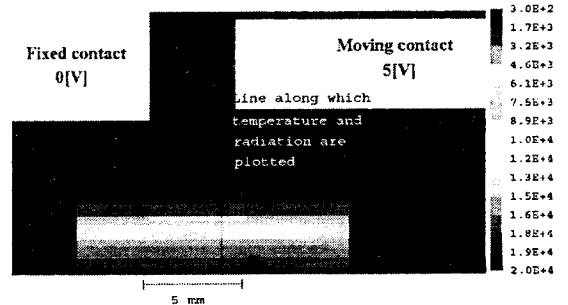


Fig. 3 Temperature distributions used to initial the calculation.

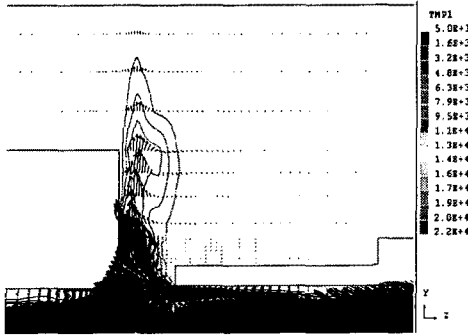


Fig. 4 Temperature distribution and velocity vector at 5ms.

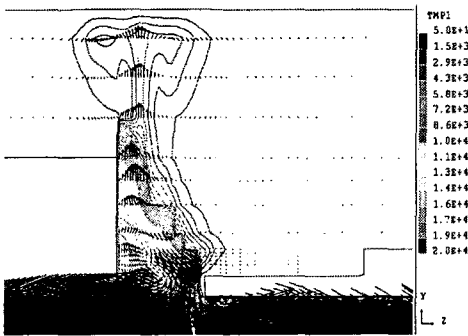


Fig. 5 Temperature distribution and velocity vector at 10ms.

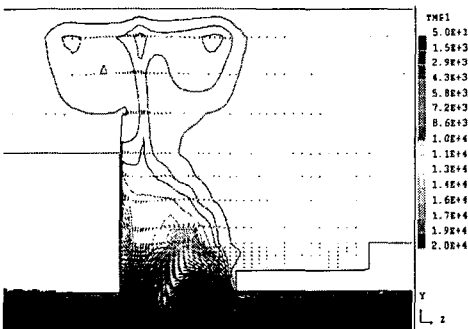


Fig. 6 Temperature distribution and velocity vector at 15ms.

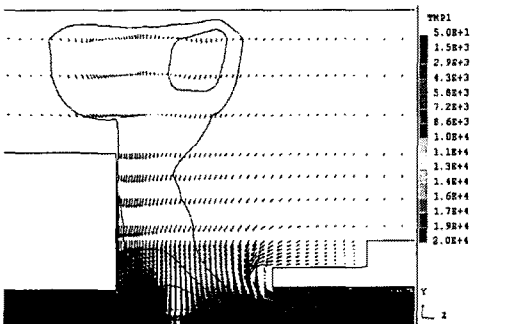


Fig. 7 Temperature distribution and velocity vector at 20ms.

전류영점으로 향하는 7.5(ms)에서는 이전 반경방향

으로 성장된 아크 반경이 확산현상으로 축방향으로 발달함을 볼 수 있으며, 전류영점 부근인 10(ms)에서는 대전류 영역에서의 아크에너지 유입으로 인하여 증가된 챔버 압력에 의해 유동이 외부로 빠져 나감을 볼 수 있다. 이는 차단기가 전류영점에서 고장전류를 차단할 수 있는 능력을 보여주는 현상이다.

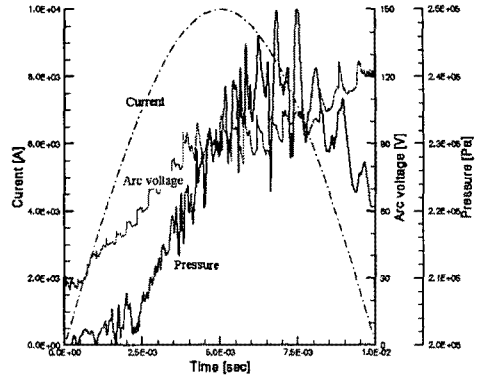


Fig. 8 The arc voltage and pressure rise in the auto-expansion chamber as a function of time.

시간에 따른 챔버 내부에서의 압력과 아크전압을 Fig. 8에 나타내었다. 대전류 영역에서의 아크전압은 50~100[V]이고, 최대상승압력은 0.5(bar)를 나타내고 있다. 전류 최대치 도달시간과 압력상승 최대치 도달시간이 다른 것에서 챔버 내 압력상승치는 냉가스에 흡수된 복사량에 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 아크 영역에 걸쳐 에너지가 입력되며, 전류영점 영역에 도달해서야 압력강하가 발생하여 아크를 소호할 수 있는 능력을 나타냄을 알 수 있다.

4. 결 론

이상을 정리한 본 논문에서의 결론은 다음과 같다.

- 1) 대전류 영역에서 아크에 의해 발생하는 많은 양의 에너지가 소호부 내 압력상승을 일으키며, 전류영점 영역에 도달하면 압력강하가 발생하여 아크를 소호할 수 있는 추진력을 발휘하는 것을 알 수 있었다.
- 2) 전류영점 부근에 대한 해석은 전류값이 급격히 작아져 반경방향의 온도 기울기 변화가 매우 크므로 이와 같은 온도분포를 얻기 위해서는 보다 정밀한 계산이 요구되며, 아크가 소호된 이후에도 공간에는 수 천도의 뜨거운 가스가 분포하고 있어 이러한 열가스 분포를 파악하는 것은 절연특성을 파악하는데 매우 중요함을 알 수 있다.
- 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] Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, D. C. 1980.
- [2] Mori, T., Ohashi, H., Mizoguchi, H. and Suzuki, K., "Investigation of Technology for Developing Large Capacity and Compact Size GCB", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 12, No. 2, pp. 747-753, 1997.
- [3] Fang, M. T. C., and Zhang, J. F., "The dynamic behavior of nozzle arcs," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. PS-14, pp. 350-356, 1986.