

PHOENICS Code를 이용한 자력팽창 소호부 내 아크유동해석

이종철^o, 이방욱, 오일성
LG 산전 전력연구소 전력기술연구1팀

The Flow Analysis of Arc in LG Hybrid Interrupter
Using PHOENICS Code

J.C. Lee^o, B.W. Lee, I.S. Oh
EPR Team, Electro-Technology R&D Center, LG Industrial Systems

Abstract - This paper describes the use of the PHOENICS CFD package for the simulation of the high-current period of the arcing process in a hybrid rotating arc/auto expansion MV interrupter. The operating principle of this device depends on rapid arc rotation due to the magnetic field created by the fault current through a coil which is mounted on contacts and also relies on the principle of thermal expansion created by arc energy in extinguishing chamber and finally causes pressure rise in expansion volume. This paper is divided into three main sections. The first gives a brief overview of the interrupter. The second section gives a full description of the methods used in the calculation. The final section presents some sample results for the hybrid interrupter.

본 연구에서는 앞서 발표된 관련논문(3)에서 실시한 구동코일의 설계 및 제작, 팽창실에 관한 설계, 아크발생 장치 및 모의 소호부 챔버를 제작하여 차단시험 등을 기초자료로 하여, 자력팽창 소호부 내 아크유동 특성을 해석하고자 한다. 이를 위하여 압축성 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 보존법칙이 확실히 만족되고, 수렴성이 좋은 유체 유동장 해석에 일반적으로 많이 사용되는 유한체적법(FVM)을 이용하여 아크를 포함한 유동장을 계산한 방법에 대해 연구한 결과를 기술한다.

2. 수치해석

2.1 유동장 계산

자력팽창식 소호부 축을 따르는 단면도가 그림 1에 나타나 있다. 차단부 내에서 발생하는 아크를 포함한 압축성 유동을 해석하기 위하여 국부적 열역학 평형상태(LTE)를 가정하였으며, 계산에 사용될 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 그리고 난류운동에너지 k, 난류운동에너지 소산율 ε에 대한 방정식을 일반적인 보존형 Navier-Stokes 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

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

여기서 Γ_g 는 변수 ϕ 에 대한 유효확산계수이며, S_g 는 생성항을 나타내고 있다. 각 유동변수에 따른 유효확산계수와 생성항은 Table 1에 요약하였다[4,5]. w는 축방향 속도성분, v는 반경방향 속도성분, u는 각방향 속도성분, h는 엔탈피를 나타낸다. 차단기 내의 가스유동은 대개 축방향 성분이 지배적이며, 유동에 미치는 중력은 무시할 수 있다. 위의 각 식들의 생성항 S_w, S_v, S_u, S_h 는 다음과 같으며, 전자기력, 난류, 복사, 주열의 영향을 고려한 것이다.

1. 서론

SF₆가스를 차단매질 및 절연매질로 이용하는 소호방식은 20년 이상 많은 연구개발이 진행되어 왔으며, 최근까지 주로 적용하고 있는 소호방식을 크게 4가지로 나누면 전자식(rotary-arc)소호방식, 열팽창식(thermal expansion)소호방식, 분사식(puffer)소호방식, 자력팽창식(hybrid)소호방식 등이 있다. 초고압 기기에서는 대부분 피스톤에 의해 실린더 내에서 절연가스가 압축되고, 이 압축된 가스가 전극 사이의 아크를 향해 강하게 분출되어 아크를 소호하는 방식인 분사식 소호방식을 선호하고 있지만, 배전급 기기에서는 구동 메커니즘의 단순화 및 접점 용삭 방지, 대기압 수준의 SF₆ 가스압 사용 등이 요구되므로, 앞서 언급한 새로운 소호방식이 등장하여 사용되고 있다. 이중 자력팽창식 소호방식은 앞에서 언급한 전자식 소호방식과 열팽창식 소호방식을 합친 새로운 중첩 소호방식으로 다른 소호방법에 비해 차단전류의 증가에 따른 아크소호능력이 매우 우수하며, 가격경쟁력과 제작의 용이성 등을 갖춰 배전급 차단기기의 성능 향상에 이상적인 소호방식으로 인정되고 있다 [1].

차단기의 차단성능을 파악하기 위해서는 아크와 유동간의 상호작용을 정확히 해석한다. 하지만 소호부 내에서 일어나는 아크 소호 메커니즘은 아크의 비정상성, 3차원성 등 매우 복잡하기 때문에 실험적으로 조사하는 것은 용이하지 않다.

최근 들어 수치기법, 격자생성기법, 난류모델, 경계조건 적용, 전처리 및 후처리 기법, 그리고 컴퓨터 기술의 발달로 인하여 여러 분야의 설계에 있어 유용한 도구로 자리잡은 전산유체역학(CFD)[2]은 시대의 흐름에 맞추어 전기, 전자기기 분야의 응용에서도 활발히 진행 중에 있다.

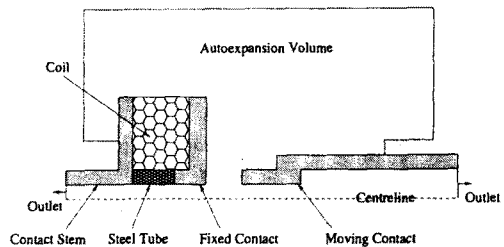


그림 1 자력팽창식 소호부 해석영역

Table 1 유도변수에 따른 유효확산계수와 생성항

Equations	φ	Γ_φ	S_φ
Axial mom.	w	$\mu_l + \mu_t$	S_w
Radial mom.	v	$\mu_l + \mu_t$	S_v
Azimuthal mom.	u	$\mu_l + \mu_t$	S_u
Energy	h	$\frac{k_l + k_t}{c_p}$	S_h

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

$$S_v = -\frac{\partial P}{\partial r} + (\vec{J} \times \vec{B})_r + \frac{\rho u^2}{r} - \frac{2(\mu + \mu_t)v}{r^2} + \text{other viscous terms} \quad (3)$$

$$S_u = -\frac{\rho v u}{r} - \frac{2(\mu + \mu_t)u}{r^2} - \frac{u}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\mu + \mu_t) + (\vec{J} \times \vec{B})_\theta \quad (4)$$

$$S_h = \frac{dp}{dt} + \sigma E^2 + q + \text{viscous dissipation terms} \quad (5)$$

여기서 \vec{J} 는 전류밀도벡터, \vec{B} 는 자속밀도벡터, σ 는 SF₆가스의 전기전도도, E는 전계의 세기이다.

2.2 전기장 및 자기장 계산

차단부 내에서 발생하는 아크는 고압 아크 방전의 일종이며, 단위 시간당 많은 에너지를 전달하게 된다. 본 연구에서는 이 열원을 주열원으로 표현하여 에너지보존방정식의 생성항 (5)에 추가하여 계산하였다. 전기장 계산에 사용될 관련식들은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (7)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (8)$$

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (9)$$

코일에 의한 자기장 계산에 사용되는 Maxwell 방정식에서 다음과 같이 관련식을 유도할 수 있다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (10)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (11)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (12)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\nu} \nabla \times \vec{A} = \vec{J} \quad (13)$$

$$\nabla^2 \vec{A} = -\nu \vec{J} \quad (14)$$

전류가 각방향 성분만을 가지는 경우에 자기벡터포텐셜 \vec{A} 도 한 방향 성분 A_θ 만을 가지게 된다. 따라서 본 연구의 자기장 해석을 위해 사용되는 관련식은 다음과 같

다.

$$\begin{aligned} \nabla^2 A_\theta &= -\nu J_\theta + \frac{A_\theta}{r^2} && \text{in the coil} \\ &= \nu \sigma A_\theta + \frac{A_\theta}{r^2} && \text{in other conducting parts} \\ &= \frac{A_\theta}{r^2} && \text{in non-conducting parts} \end{aligned} \quad (15)$$

2.3 난류모델

난류모델은 점성저층 영역의 많은 격자수를 피하고 벽 근처 지역을 연결시켜주기 위하여 벽함수(wall function)를 사용하는 표준 k- ϵ 모델을 사용하였다. 이를 위해서는 첫 번째 격자점의 위치가 무차원거리 $y^+ (= yu_\tau/\nu)$ 가 30~300의 영역에 존재하여야 한다. 계산에 사용될 난류운동에너지 k 와 난류운동에너지 소산율 ϵ 에 대한 방정식을 식(1)의 형식으로 Table 2에 요약하였다.

Table 2 난류변수에 따른 유효확산계수와 생성항

Equations	φ	Γ_φ	S_φ
kinetic energy	k	$\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$\rho(P_k - \epsilon)$
dissipation rate	ϵ	$\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$\rho \frac{\epsilon}{k} (c_{1\epsilon} P_k - c_{2\epsilon} \epsilon)$

위식에서 생성률 P_k , 동점성계수 ν_t , 상수들은 다음과 같다.

$$P_k = \rho \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (16)$$

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon \quad (17)$$

$$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (18)$$

2.4 복사모델

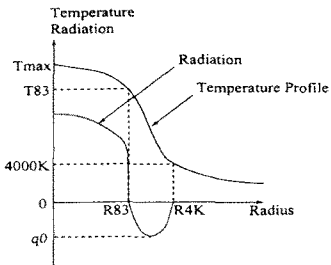


그림 2 간이방사모델(Approximation Radiation Model)

아크 내에서의 복사 열전달을 계산하는데 많은 어려운 문제들이 있으며, 차단부 내에서 발생하는 아크는 거의 실린더 형상이기 때문에 Liebermann and Lowke(6)에 의해 계산된 순방출계수(net emission coefficient)를 이용하고 있다. 본 논문에서는 그림 2와 같이 반경방향의 온도분포를 이용하여 방출 및 재흡수되는 구간을 온도에 따라서 설정하여 에너지를 계산하는 Zhang et al.(7)에 의해 개발된 간이방사모델(approximation radiation model)을 사용하였다.

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 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.

그림 3은 계산시간 0.1(ms)일 때 반경방향으로의 온도 분포와 순방출계수 분포를 나타내고 있다. 이미 온도분포와 순방출계수 분포 모두 아크의 특성 모양을 취하고 있음을 볼 수 있다.

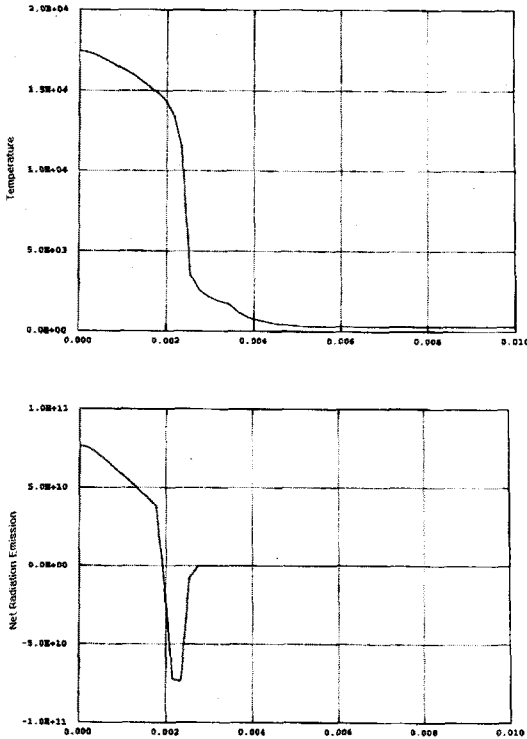


그림 3 0.1ms에서의 온도분포와 순방출계수 분포

그림 4는 대전류 차단시 발생하는 아크전압과 소호부 내의 압력상승 결과를 나타내고 있다.

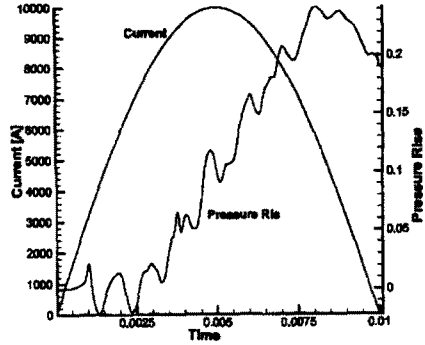
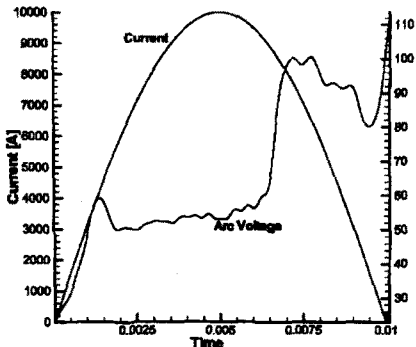


그림 4 자력팽창식 소호부 내 아크전압과 압력상승

대전류 영역에서의 아크전압은 50~100이고, 최대상승 압력은 0.24를 나타내고 있다. 전류 최대치와 압력상승 최대치 사이의 간격에서 압력상승치는 냉가스에 흡수된 복사량에 영향을 받을 수 있다. 따라서 아크영역에 걸쳐 에너지가 입력되며, 전류영점 영역에 도달해서야 압력강하가 발생함을 알 수 있다.

3. 결 론

자력팽창식 소호부 내 아크를 포함한 유동특성을 파악하기 위하여 상용 CFD 프로그램인 PHOENICS 코드에 복사열전달과 난류, 로렌츠 힘을 고려할 수 있도록 프로그램하였고, 자력팽창식 소호부 내 압력, 온도, 속도, 전기장, 자기장을 구하였다.

대전류 영역에서 발생하는 아크에 의하여 입력된 에너지가 소호부 내 압력상승을 일으키며, 전류영점 영역에 도달해서야 압력강하가 발생함을 알 수 있었다. 차단 특성 해석을 위해서는 전류 영점 구간에서도 모의할 수 있는 기법과 이에 대한 물리적 현상을 뒷받침 할 수 있는 실험적 연구도 병행되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Scarpa, B. Dauby, "SF₆ Atuo Expansion Circuit Breaker Design", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7 No.1, January 1992.
- [2] Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington, DC., 1980.
- [3] 이방욱, Choukov, V., 서정민, "아크회전과 열팽창 방식을 적용한 소호부에 대한 아크유동 해석", 2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2000.
- [4] Yan, J. D., Fang, M.T.C., Chris, J., "Electrical and Aerodynamics Behavior of Arcs Under Shock Conditions", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 25, No. 5, 1997.
- [5] Yan, J. D., Nuttala, K. I., Fang, M.T.C., "A Comparative Study of Turbulence Models for SF₆ Arcs in a Supersonic Nozzle", J. Phys. D: Appl. Phys. 32, pp. 1401-1406, 1999.
- [6] Liebermann, R.W., Lowke, J.J., "Radiation Emission Coefficients for Sulfur Hexafluoride Arc Plasmas", J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer., Vol. 16, pp. 253-264, 1976.
- [7] Zhang, J.F., Fang, M.T.C., Newland, D.B., "Theoretical Investigation of a 2kA Arc in a Supersonic Nozzle", J. Phys.D:Appl.Phys. Vol. 20, pp. 368-379,1987.