

파퍼형 GIS/GCB의 유동특성 해석

송기동*, 신영준, 박경업, 최영길, *송원표, **강종호
한국전기연구원 개폐장치연구팀, *효성중공업(주), **현대중공업(주)

Flow field Analysis In Puffer Type Interrupters of GIS/GCB

K.D. Song, Y.J. Shin, K.Y. Park, Y.G. Choi, *W.P. Song, **J.H. Kang
K.E.R.I., *Hyosung Indus. Co., Ltd., **Hyundai Heavy Indus. Co., Ltd.

ABSTRACT

FLIC(Fluid in cell) method has been used for analyzing a cold gas flow field in an interrupter of a circuit breaker since 1970s. In this paper FLIC method is applied to calculation of a cold gas flow and then combined with the simple arc analysis method in order to investigate the flow field characteristics in a puffer type interrupter rated at 145kV 40kA. The results for a cold gas flow agree with the experimental measurement well. The other results such as pressure rise, arc temperature, post-arc current and so forth are also reasonable and show the possibility that the combined program can be applied to the design of UHV interrupters.

1. 서론

차단기내에서 가스유동이 차단특성에 미치는 영향은 매우 크다는 것은 익히 잘 알려져 있는 사실이며, 아크에 의한 가스유동특성을 파악하는 것은 차단기의 설계 및 제작에 있어서 필수적인 것이다. 현재까지 차단기내의 아크모멘텀은 여러나라에서 연구되어 왔고, 여러 모델들이 제시되고 있지만, 아직까지 실제 차단현상과는 다소 거리가 있는 실정이다.

차단기내의 가스유동해석에 있어서 중요한 파라미터인 파퍼실린더의 용적에 따른 압력상승, 노즐 상류장 및 전극형상에 따른 압력분포, 속도분포, 전류영점후의 절연회복을 위한 노즐하류장의 밀도분포 등에 주안점을 두고 해석한다.

본 연구에서는 FLIC법[1]을 응용하여 실제 차단기(145kV 40kA GCB)에 적용시켜 소호부내의 냉가스 유동특성을 해석하고 실험치와 비교하였으며, 아크모멘텀을 접목시켜 진류크기에 따른 아크반경, 아크온도, 냉가스로의 에너지전달 등을 계산하였다. 또한 전류영점후의 열류해석을 통해 열적파괴가 일어나는가의 여부를 파악하였다.

2. 해석방법

2.1 기본식

2차원축대칭 압축성유동해석을 위한 기본식(Finite-difference formulae)은 아래와 같이 질량, 운동량, 에너지보존법칙에서 얻어진다.[1]

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = q + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} + \frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \epsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \epsilon \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

$$\rho \frac{DI}{Dt} + P \frac{\partial u}{\partial x} = -q \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \epsilon \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \rho \epsilon \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \epsilon \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial x} \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2} |u| \delta x \quad (4)$$

여기서, 에너지 $E = I + \frac{(u^2 + v^2)}{2}$, I 는 비내부에너지(specific

internal energy), u 는 가스속도, q 는 인위적인 점성항(artificial viscosity), ρ 는 밀도, P 는 압력, t 는 시간이다. 또한, 식(5)와 같은 상태방정식이 적용된다.

$$P = (\gamma - 1)\rho I \quad (5)$$

여기서, γ 는 비열비(ratio of specific heat = C_p/C_v)이다.

2.2 냉가스 유동해석

FLIC법[1]으로 유동문제에 대한 해를 얻기 위해 계산영역을 일정한 수의 셀(cell)로 분할하고, 밀도, 속도, 비내부에너지의 초기값들을 각 셀에 대해서 정의한다. 계산영역의 한 셀에 시간 $t = n\delta t$ 에서 각각의 파라미터 ρ_{ij}^n , u_{ij}^n , v_{ij}^n , I_{ij}^n 등이 셀(i,j)에 정의되었다고 한다면, $t = (n+1)\delta t$ 에서의 값들을 얻기 위해서는 두 단계의 계산과정이 필요하다.

첫번째 단계로 각각의 셀에 있어서 ρ_{ij}^n , I_{ij}^n 와 상태방정식을 써서 압력 P_{ij}^n 를 먼저 계산하고, 속도와 비내부에너지의 증도값(intermediate values)들을 관계식으로 구한다.

두번째 단계에는 전달효과(transport effects)가 계산된다. 셀과 셀사이를 흐르는 유량은 부여셀(donor cell)의 밀도에 비례한다. 이러한 부여셀은 사용할 경우, 어떤 셀 자체가 완전히 비어

밀도가 음(-)으로(negative density) 된 가능성을 미리 배제한 수 있고, 가스의 속도가 대단히 작은 영역에 있어서도 신뢰성이 매우 좋은 결과를 얻을 수 있다.

시간중분 δt 동안에 면적 S_j^2 를 횡단하는 유량을 $\Delta M_{i,j,12j}^n$ 이라 하고, $S_{j,12j}^2$ 를 횡단하는 유량을 $\Delta M_{i,j,12j}^n$ 이라 하자. 셀 ij 의 오 큰쪽변에 대한 유량(mass flow)은

$$\begin{aligned}\Delta M_{i,j,12j}^n &= S_j^2 \rho_{ij}^n \tilde{u}_{i,j,12j}^n \delta t & (\tilde{u}_{i,j,12j}^n > 0) \\ &= S_j^2 \rho_{i,j,12j}^n \tilde{u}_{i,j,12j}^n \delta t & (\tilde{u}_{i,j,12j}^n < 0)\end{aligned}\quad (6)$$

셀 ij 의 상단면에 대한 유량은

$$\begin{aligned}\Delta M_{i,j,12j}^n &= S_{j,12j}^2 \rho_{ij}^n \tilde{v}_{i,j,12j}^n \delta t & (\tilde{v}_{i,j,12j}^n > 0) \\ &= S_{j,12j}^2 \rho_{i,j,12j}^n \tilde{v}_{i,j,12j}^n \delta t & (\tilde{v}_{i,j,12j}^n < 0)\end{aligned}\quad (7)$$

와 같이 계산될 수 있다.

셀 ij 에서의 밀도에 대한 새로운 값은 질량보존의 법칙을 적용함으로써 얻어질 수 있다. 즉,

$$\rho_{ij}^{n+1} = \rho_{ij}^n + \frac{1}{V_j} (\Delta M_{i,j,12j}^n + \Delta M_{i,j,12j}^n - \Delta M_{i,j,12j}^n + \Delta M_{i,j,12j}^n)\quad (8)$$

운동량과 에너지의 진단은 셀 경계를 횡단하는 유량이 부여셀의 중도속도성분값과 비에너지를 수송한다고 한다면 계산될 수 있다. 시간 $(n+1)\delta t$ 에서의 속도성분과 단위질량당 에너지 E 는 다음의 관계식을 이용해서 얻어진다.

$$\begin{aligned}u_{ij}^{n+1} &= \frac{1}{\rho_{ij}^{n+1} V_j} \{ T_{ij}(1) \tilde{u}_{i,j,12j}^n \Delta M_{i,j,12j}^n + T_{ij}(2) \tilde{u}_{i,j,12j}^n \Delta M_{i,j,12j}^n \\ &\quad - T_{ij}(3) \tilde{u}_{i,j,12j}^n \Delta M_{i,j,12j}^n - T_{ij}(4) \tilde{u}_{i,j,12j}^n \Delta M_{i,j,12j}^n \\ &\quad + \tilde{u}_{ij}^n [\rho_{ij}^n V_j + (1 - T_{ij}(1)) \Delta M_{i,j,12j}^n + (1 - T_{ij}(2)) \Delta M_{i,j,12j}^n \\ &\quad - (1 - T_{ij}(3)) \Delta M_{i,j,12j}^n - (1 - T_{ij}(4)) \Delta M_{i,j,12j}^n]\}\end{aligned}\quad (9)$$

$$\begin{aligned}v_{ij}^{n+1} &= \frac{1}{\rho_{ij}^{n+1} V_j} \{ T_{ij}(1) \tilde{v}_{i,j,12j}^n \Delta M_{i,j,12j}^n + T_{ij}(2) \tilde{v}_{i,j,12j}^n \Delta M_{i,j,12j}^n \\ &\quad - T_{ij}(3) \tilde{v}_{i,j,12j}^n \Delta M_{i,j,12j}^n - T_{ij}(4) \tilde{v}_{i,j,12j}^n \Delta M_{i,j,12j}^n \\ &\quad + \tilde{v}_{ij}^n [\rho_{ij}^n V_j + (1 - T_{ij}(1)) \Delta M_{i,j,12j}^n + (1 - T_{ij}(2)) \Delta M_{i,j,12j}^n \\ &\quad - (1 - T_{ij}(3)) \Delta M_{i,j,12j}^n - (1 - T_{ij}(4)) \Delta M_{i,j,12j}^n]\}\end{aligned}\quad (10)$$

$$\begin{aligned}E_{ij}^{n+1} &= \frac{1}{\rho_{ij}^{n+1} V_j} \{ T_{ij}(1) \tilde{E}_{i,j,12j}^n \Delta M_{i,j,12j}^n + T_{ij}(2) \tilde{E}_{i,j,12j}^n \Delta M_{i,j,12j}^n \\ &\quad - T_{ij}(3) \tilde{E}_{i,j,12j}^n \Delta M_{i,j,12j}^n - T_{ij}(4) \tilde{E}_{i,j,12j}^n \Delta M_{i,j,12j}^n \\ &\quad + \tilde{E}_{ij}^n [\rho_{ij}^n V_j + (1 - T_{ij}(1)) \Delta M_{i,j,12j}^n + (1 - T_{ij}(2)) \Delta M_{i,j,12j}^n \\ &\quad - (1 - T_{ij}(3)) \Delta M_{i,j,12j}^n - (1 - T_{ij}(4)) \Delta M_{i,j,12j}^n]\}\end{aligned}\quad (11)$$

$$\begin{aligned}T_{ij}(k) &= 1(\text{번 } k\text{를 횡단하여 셀}ij\text{로 유체가 흘러들어오는 경우}) \\ &= 0(\text{번 } k\text{를 횡단하여 셀}ij\text{의 밖으로 흘러나가는 경우})\end{aligned}$$

비내부에너지는 다음의 관계식에서 얻어진다.

$$E_{ij}^{n+1} = E_{ij}^{n+1} - \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \rho_{ij}^{n+1}\quad (12)$$

2.3 아크에 의한 열류해석

본 연구에서 아크를 포함한 유동해석은 다음과 같은 과정으로 이루어진다.

1) 아크내부에서 반경방향으로의 열전도도, 온도, 압력은 일정하다고 가정하고, 아크에 인접한 냉가스의 압력은 아크의 압력과 같다고 가정한다.

2) 전류의 크기에 따른 아크반경을 다음식으로 계산한다.[2]

$$R_a = K \cdot \sqrt{I_a} \cdot \sqrt{\frac{L_a}{P_a}}\quad (13)$$

여기서, R_a : 아크반경, K : 실험상수, L_a : 아크길이, I_a : 아크전류, P_a 는 아크압력을 나타낸다.

3) 아크온도를 계산하기 위한 아크에너지의 보존식은[3]

$$V_a \cdot I_a = h \cdot \rho \cdot u \cdot A = F \cdot m \cdot P_a \cdot A = \frac{L_a}{\sigma \cdot A} \cdot I_a\quad (14)$$

로 표현된다. 여기서, V_a : 아크전압, h : 엔탈피, ρ : 밀도, u : 가스속도, A : 아크단면적, σ 는 전기전도도를 각각 나타내며, m 은 마하수로

$$m = \sqrt{\frac{2}{\gamma} \cdot \left\{ \left(\frac{P_a}{P_d} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\}}\quad (15)$$

로부터 계산되어진다. 여기서, P_a 는 노즐하류장의 압력을 나타낸다. F 는 엔탈피유동(Enthalpy flow)으로

$$F = \frac{\rho \cdot c \cdot h}{P}\quad (16)$$

로 표현되며, c 는 가스의 음속도이다. 식(14)를 다시 정리하면,

$$f(T_a) = 1 - \frac{F \cdot m \cdot P_a \cdot A^2 \cdot \sigma}{L_a \cdot I_a^2} = 0\quad (17)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 임의의 아크온도 T_a 에 대한 $\sigma(T_a)$, $F(T_a)$ 를 구하고, 식(17)에 대입해서 $f(T_a) = 0$ 를 만족할 때까지 반복적으로 계산하여 아크온도 T_a 를 구한다.

4) 아크로부터 냉가스로 진단되는 에너지를 계산하기 위해, 아크에 의한 방사에너지는[4]

$$E_{rad} = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_N \cdot \frac{R_a^2 \cdot P_a}{L_a}\quad (18)$$

여기서 ϵ_N 은 net emission coefficient로 이미 계산된 아크반경으로 구해진다. 일반적으로 아크에 의한 가스의 에너지진달은 아크전류의 크기가 10kA이하인 경우에 전극으로의 전도에 의한 손

실분이 약 25%, 노즐벽면으로 흡수되는 손실분이 약 15%, 가스의 대류에 의해 손실분은 약 10%로 정도이며, 그 나머지 손실분(50%)이 방사에 의해 손실된다[5]. 만약, 아크진류의 크기가 커지는 경우에는 방사에 의한 아크로부터의 에너지 손실분은 더욱 증가할 것이다. 따라서 본 연구의 아크모델링에 있어서 냉가스의 에너지전달은 방사에 의한 것만을 고려하였다. 셀(i,j)에 전달되는 에너지는

$$E_f(i,j) = E_{rad} \cdot \frac{(1 - f_a)}{f_i} \cdot \frac{\exp\left(\frac{-dr(i)}{f_i}\right)}{dr(i)^2} \quad (19)$$

와 같이 된다. 여기서 f_a 는 방사분(radiation fraction), f_i 는 흡수길이(absorption length), dr 는 아크로부터 반경방향으로의 길이를 나타낸다.

이상과 같이 위에서 구해진 아크 파라미터로 아크에 의한 냉가스의 유동특성의 변화를 각각의 셀들에 있어서 압력, 온도, 내부 에너지의 변화를 계산한다.

2.4 계산모델

< 모델차단기의 개략도 >

그림 1에 유동해석을 위한 모델차단기의 개략적인 구조도를 나타내고 있다. 차단기가 고정전류를 차단하기 위해 노즐과 실린더, 가동전극이 좌측으로 움직이면, 실린더의 용적이 줄어들어 실린더내의 가스는 압축되고 두접점사이에 발생하는 아크에 분사되어 아크를 소호한다. 하지만 계산에 있어서는 피스톤과 고정전극이 움직이는 것으로 모의했다.

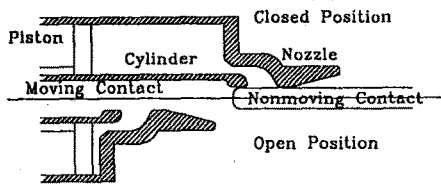


그림 1. 파피형 모델차단기의 개략도.

< 계산격자 >

그림 2에는 계산격자로 분할된 2차원축대칭 노즐부의 셀의 조건을 나타내고 있다. 여기서, 각 셀의 특성이 0인 경우는 가스부, 1인 경우는 고체부, 2인 경우는 부분셀(partial cell: 가스영역과 고체영역이 공존하는 셀)로 정의되고 있다.

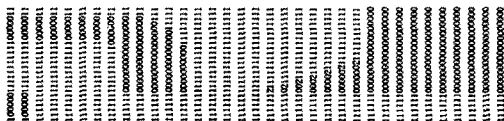


그림 2. 모델차단기 노즐부의 계산격자.

< 측정치 >

그림 3에는 모델차단기의 무부하 동작시에 측정된 스트로크와 비퍼실린더, 노즐상류장에서의 압력을 나타내고 있다.

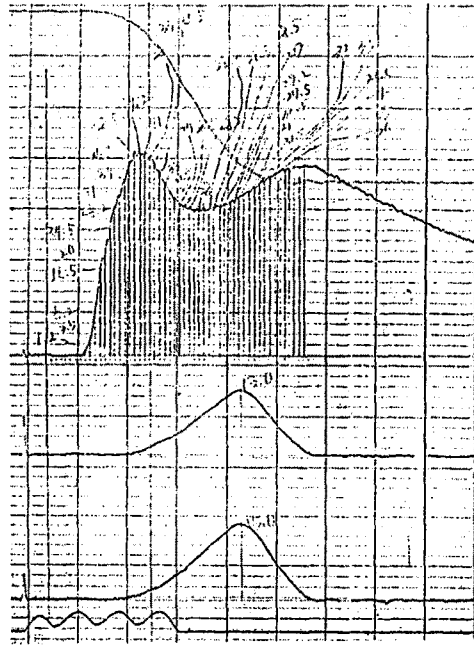


그림 3. 모델차단기 무부하동작시의 측정치.

3. 계산결과 및 분석

그림 4에는 가동접점이 스트로크곡선을 따라 진행해 감에 따라 소호부속상에 5 ms단위로 가동접점의 선단의 위치를 나타내고 있으며, 유동경로 중 중요하다고 인식되는 10곳의 위치에서 압력변화를 분석하기 위해 원숫자로 표시되어 있다.

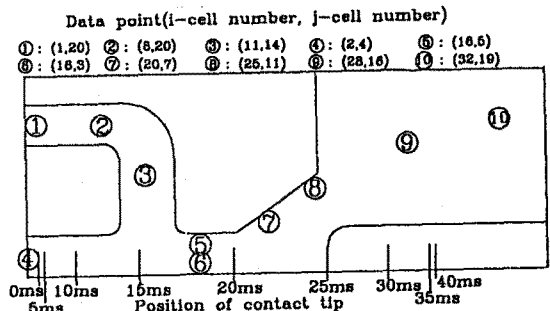


그림 4. 계산결과를 분석하기 위한 해석점.

가동접점이 접촉상태에서 행정이 완료된 때까지 무부하상태, 즉 아크가 일어나지 않고 냉가스만이 파피실린더내에서 압축되어 유동경로를 따라 흐를 때의 파피실린더내부의 압력변화와 노즐상류장에서의 압력변화가 그림 5와 6에 각각 나타나 있다. 각각의 그림에서 실선은 효성중공업(주)이 본 연구에 채택된 모델차단부

에 압력센서를 취부하여 무부하시의 냉가스압력변화를 실험적으로 측정할 것을 나타내며, 점선은 본 연구에서 FLIC법으로 냉가스유동해석을 한 결과를 나타내고 있다. 해석결과 스트로크 시작 후 약 10 ms기간과 스트로크 완료전후에는 해석치가 측정치보다 다소 높고, 최대 압력상승이 발생한 시점후 약 10 ms동안에는 해석치가 측정치보다 다소 낮지만, 전체적으로 해석치와 측정치는 비교적 잘 일치하고 있다.

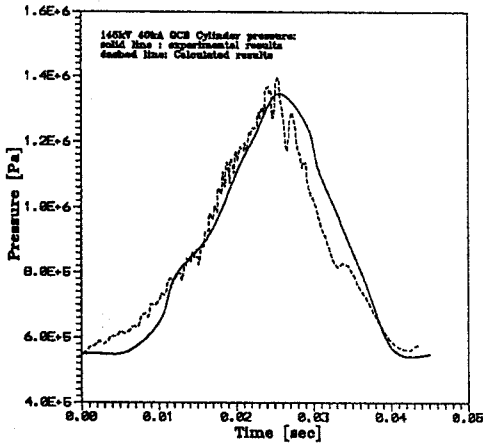


그림 5. 파퍼실린더의 압력변화.

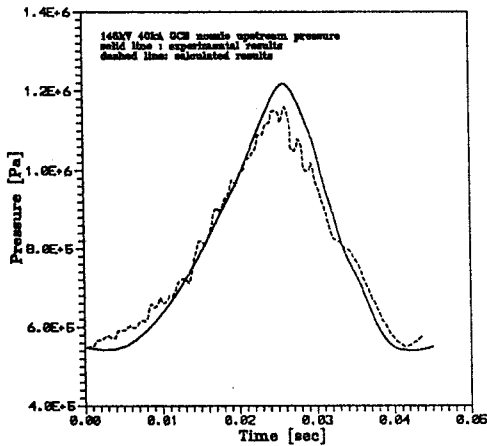


그림 6. 노즐상류장에서의 압력변화.

그림 7에는 여러가지 유동경로상에서의 압력변화를 나타내고 있으며, 대체로 상류장의 압력상승은 크지만 하류장의 압력변화는 비교적 작다. 고정점점측 ④의 압력변화를 보면 스트로크 시작 후 약 10 ms시점에서 압력이 0.5 MPa이하로 떨어지는 이유는 가동점점의 순간적 이동에 의한 것으로 추정되며, 노즐하류장이 시작하는 시점인 ⑦의 압력이 스트로크 시작 후 약 25 ms시점에서 약 0.4 MPa로 급작스레 감소했다가 약 30 ms시점에서 다시 회복하는 이유는 가동점점이 노즐하류장을 빠져나감에 따라 유동 분리(flow separation)가 노즐하류장의 시작지점에서 발생하기 시작하여 점차 하류장쪽으로 이동하기 때문인 것으로 사료된다.

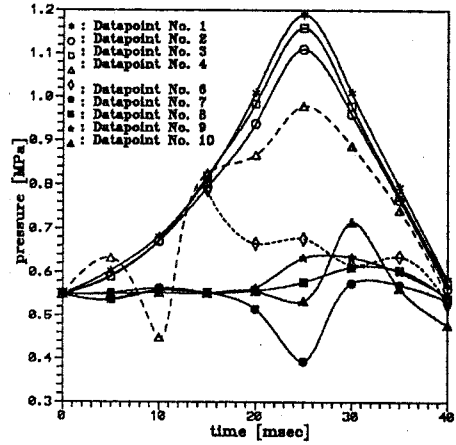


그림 7. 각 해석점에 있어서의 압력변화.

유부하시, 즉 아크가 발생한 경우 파퍼실린더내부의 압력변화와 무부하시의 압력변화를 비교해서 그림 8에 나타내고 있다. 무부하시와 마찬가지로 가동점점이 노즐하류장 출구를 빠져나가는 시점에서 무부하시보다 약 0.5 MPa의 압력상승이 일어났다. 이는 아크에 의해 가열팽창된 가스압과 아크가 노즐목용 봉쇄(clogging)하여 상승하는 가스압에 의한 것이다.

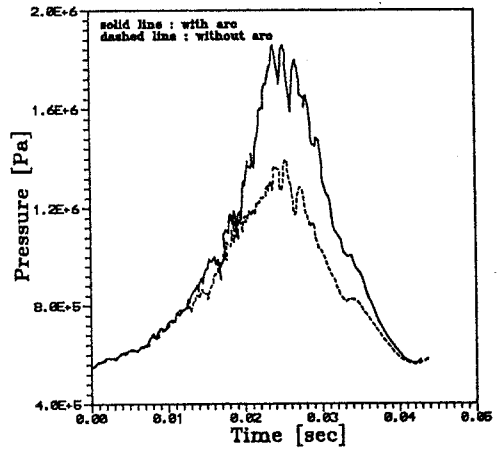


그림 8. 유부하시의 파퍼실린더의 압력.

그림 9에는 점점이 분리되기 시작하여 아킹시간 14.4 ms후인 두번째 진류영점에서 진류를 차단한 경우의 아크온도의 변화와 노즐목봉쇄가 일어나지 않을 때의 아크반경의 변화를 나타내고 있으며, 영전류후에 이 모델차단부의 열적회복특성을 알아보기 위해 영전류후의 아크후진류(post-arc current)와 고온가스의 온도변화를 고찰한 결과가 그림 10에 나타나 있다. 아크진류는 약 4.5 A까지 흐르다 점점사이의 절연내력이 점차 회복되어 감에 따라 감소되어 영이 되고, 열적회복에 성공하게 된다.

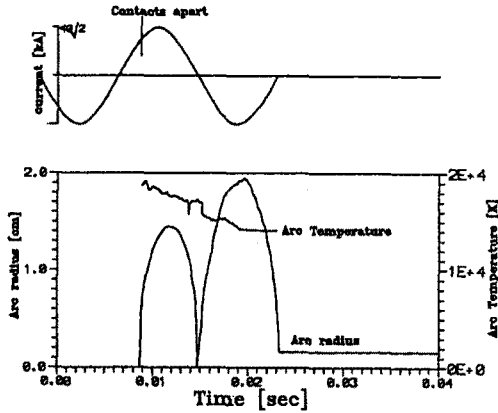


그림 9. 시간에 대한 아크반경 및 아크온도의 변화.

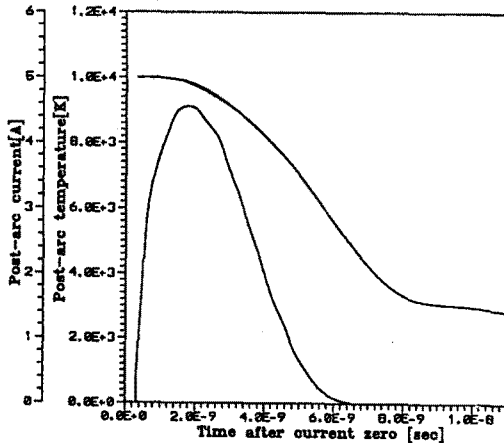


그림 10. 영전류후의 아크전류와 고온가스온도.

4. 결론

본 연구의 결과로 수치해석적으로 보다 간편하고, 신뢰성이 있는 FLIC법으로 차단기 소호부의 냉가스 유동해석법을 제시하였으며 아크모델링을 접목시켜 아크 파라미터에 대한 적용방법을 제시하였다. 본 연구에서 언급하고 있는 프로그램은 아크로부터 냉가스로의 에너지전달을 복사에너지만을 고려한 점, 전류영점후의 차단특성을 판단기준으로 전인회복(TRV의 최고치)은 고려치 않고 열적회복만을 고려한점, 복잡한 모델링의 과정 등, 아직까지 다소 문제점을 가지고 있다. 하지만, 향후 지속적인 연구와 수정 보완작업을 하여 앞으로 개발할 예정인 362kV 63kA차단기와 800kV 40kA차단기의 중요한 설계변수를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

<참고문헌>

1. Richard A.Gentry, Robert E.Martin, and Bart J.Daly,"An Eulerian Differencing method for Unsteady Compressible Flow Problems", J.COMPT. Phys.,1, P87-118, 1966.
2. Klaus Ragaller, "Current Interruption in High-Voltage Networks", pp.299 - 326., 1978 Plenum Press, New York.
3. Leslie S. Frost and Richard W.Liebermann, "Composition and Transport Properties of SF₆ and Their Use in a Simplified Enthalpy Flow Arc Model", Proc. IEEE, Vol. 59, No. 4, April 1971, pp474 - 484.
4. R.W.Liebermann and J.J.Lowke, "Radiation Emission Coefficients for Sulfur Hexafluoride Arc Plasmas", J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. Vol.16, pp-253-264. Pergamon Press 1976.
5. A. Gleizes, A.Mahieddin., "Study of a Circuit-Breaker Arc with Self-Generated Flow: part I-Energy Transfer in the high-current phase", IEEE Trans. on plasma science. Vol. 16, Dec. 1988.