

전산수치해석을 통한 가스차단기의 차단성능 평가

최영길¹, 이광식^{*}
한국전기연구원¹, 영남대학교^{*}

Evaluation of Current interrupting capability in GCB by computational approach

Y.K.CHOI¹, K.S.LEE^{*}
Korea Electrotechnology Research Institute¹, Yeung-Nam University^{*}

Abstract - A computational approach of the arc quenching process in GCB was developed. it is capable to calculates the thermodynamic quantities of the gas as a function of time taking into account of all spaces concerned with the arc quenching. Basically using so-called FLIC method, this program adopts 'Simplified Enthalpy Arc Model', which is somewhat modified. And, to examine whether our works were done properly, it was simulated the whole process of the arc quenching that is based on self-flow generation phenomena/current interruption in a thermal expansion type circuit breaker. This program was verified by experiments, both showed fairly good agreement.

1. 서 론

가스차단기의 대전류 차단동작시 아크소호에 이르지 않는 것으로 여겨진 대전류영역에서 아크의 노출봉쇄가 소호실 압력상승을 크게 유발하는 효과에 따라 전류영점 전후에서 오히려 차단능력을 높이는 것으로 보고되고 있다.[1] 이 사실은 아크소호현상에 대한 이론적 해석시에도 반드시 노출봉쇄효과를 고려하지 않으면 안되는 것을 시사하고 있다. 그러나, 해석상에서 아크소호과정중 아크의 반경변화와 노출봉쇄효과를 처리하기가 그렇게 쉽지는 않다. 이러한 가운데, 가스차단기의 차단부내에서 일어나는 아크소호과정에 대해 해석이 가능한 전산 수치해석 기법을 개발하였다. 이 기법은 차단 대전류에 의해서 형성되는 플라즈마 아크와 주위 냉가스 상호간에 동적 열역학량을 계산하여 아크를 포함한 가스차단부내 유동현상의 전과정을 계산가능하도록 하였다. 가스차단기내 아크해석을 위해서, 소위 FLIC법을 기초로 한, 이 해석 프로그램은 Simplified Enthalpy Arc Model을 다소 변형하여 아크모의에 적용하였다. 그리고, 본 기법에 따른 아크모의해석의 그 정확성을 확인하고 아크 플라즈마로부터 나오는 열량의 신뢰성을 얻기 위해, 우선적으로 파파 방식과는 다른, 소호부에 기구적 동작이 배제된 열평창 분사식 가스차단기(이하 GCB)를 해석모델로 선정하였다. 따라서, 본 논문에서는 GCB의 유동해석을 위해서 도입한 FLIC법을 소개하고, 아크해석에서 아크변수인 아크반경, 아크저항, 아크전압 등을 계산하여 아크의 반경을 고려한 노출봉쇄효과와 아크에너지에 의한 소호실 압력상승을 살펴보았다. 또한, 소호부에서의 아크 모의해석 결과를 실험결과와 비교하여, 전산 수치해석을 통한 아크 모의해석 가능성을 제시하였다.

2. 유동해석을 위한 지배방정식

가스차단기는 소호절연성이 우수한 SF6가스를 탱크내 충전하고 있어, 전산 수치해석에서도 FLIC법[2]에 의한 2차원 축대칭 압축성 유체해석을 기초로 아크를 모의하는 기능을 추가해서 열가스 유체해석이 가능하도록 고려하였으며, 2차원 축대칭 압축성 유체해석의 기본식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\text{div}(\rho \vec{u}) + \dot{m} \\ \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} &= -\text{grad } p - \rho(\vec{u} \text{ grad } \vec{u}) \\ \rho \frac{\partial h}{\partial t} &= -\vec{u} \text{ grad}(\rho h) + \text{div}(p \vec{u}) \\ &\quad + \sigma E^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \end{aligned}$$

where, p = pressure

ρ = gas density

\vec{u} = gas flow velocity

h = cnthalpy of gas

E = electrical field strength

σ = electrical conductivity

T = gas temperature

3. 아크를 포함한 열가스 유동해석

최근에는 컴퓨터의 발달과 더불어 수치해석에 의한 유동해석이 증가추세에 있다. 수치해석에 의한 이러한 접근은 시간 및 비용의 절감을 유도하고, 실험이 불가능했던 경우에 대해서도 검토를 가능케 하고 있다.

본 장에서는 가스차단기내 가스흐름을 해석하기 위해서 압축성 유동해석에 자주 이용되는 Fluid-In Cell(FLIC) 방식을 채택하고, 이것에 아크해석기능을 추가시킨 프로그램을 개발하였다. FLIC(Fluid in Cell)법은 충격파를 포함한 초음속 유동해석에서 높은 정밀도의 해를 얻어내는 것으로 이미 잘 알려져 있다. 특히, 이 방법은 일본에서 꾸준히 연구진행되어, 현재는 가스차단기의 설계·개발에 적극 적용되고 있다. 이러한 가운데 차단기의 전극간 개극과정, 가스압축, 아크발생 등을 포함한 고온 열가

스 흐름을 분석하여 차단성능을 평가할 수 있는 다양한 처리기능의 모의해석 프로그램이 개발되기도 하였다. 따라서, 국내의 기술개발 동향에 발맞추어, 자체 개발한 FLIC법을 이용한 유동해석 프로그램 역시 이러한 연구 개발 수준에 가능한 한 대등한 기술적 접근을 시도하였으며, 여기서는 개발적용한 해석기법을 소개하고 관련내용을 기술하고자 한다.

3.1 유동해석기법 (FLIC법)

시간 $t = n\delta t$ 에서 다음의 값들을 각 셀에 정의한다.

$$\begin{aligned} \text{밀도} & : \rho_{ij}^n \\ z\text{-속도분} & : u_{ij}^n \\ r\text{-속도분} & : v_{ij}^n \\ \text{비내부에너지} & : I_{ij}^n \end{aligned}$$

$t = (n+1)\delta t$ 동안에는 아래의 과정으로 계산된다.

첫번째 단계 : Intermediate Value

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{ij}^n &= u_{ij}^n - \frac{\delta t}{\rho_{ij}^n \delta z} [P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n + B] \\ \tilde{v}_{ij}^n &= v_{ij}^n - \frac{\delta t}{\rho_{ij}^n} \left\{ \frac{1}{2V_j} [S_{j+1/2}^n (P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n) \right. \\ &\quad \left. - S_{j-1/2}^n (P_{i,j-1}^n - P_{i,j}^n)] + B \right\} \\ \tilde{I}_{ij}^n &= I_{ij}^n - \frac{\delta t}{\rho_{ij}^n V_j} \{ P_{ij}^n (S_{j+1/2}^n \tilde{v}_{i,j+1/2}^n - S_{j-1/2}^n \tilde{v}_{i,j-1/2}^n) \\ &\quad + S_j^n [\tilde{u}_{i+1/2,j}^n P_{ij}^n - \tilde{u}_{i-1/2,j}^n P_{ij}^n] \} \end{aligned}$$

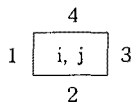
$$P_{i+1/2,j} = \frac{1}{2} (P_{ij} + P_{i+1,j}), \quad P_{i-1/2,j} = \frac{1}{2} (P_{i-1,j} + P_{ij})$$

두번째 단계 : Mass flow

$$\begin{aligned} \Delta M_{i+1/2,j}^n &= S_j^n \rho_{ij}^n \tilde{u}_{i+1/2,j}^n \delta t \quad (\tilde{u}_{i+1/2,j}^n > 0) \\ &= S_j^n \rho_{i+1,j}^n \tilde{u}_{i+1/2,j}^n \delta t \quad (\tilde{u}_{i+1/2,j}^n < 0) \\ \Delta M_{i,j+1/2}^n &= S_{j+1/2}^n \rho_{ij}^n \tilde{v}_{i,j+1/2}^n \delta t \quad (\tilde{v}_{i,j+1/2}^n > 0) \\ &= S_{j+1/2}^n \rho_{i,j+1}^n \tilde{v}_{i,j+1/2}^n \delta t \quad (\tilde{v}_{i,j+1/2}^n < 0) \end{aligned}$$

세 번째 단계 :

$$\begin{aligned} \rho_{ij}^{n+1} &= \rho_{ij}^n + \frac{1}{V_j} (\Delta M_{i,j-1/2}^n + \Delta M_{i-1/2,j}^n \\ &\quad - \Delta M_{i,j+1/2}^n + \Delta M_{i+1/2,j}^n) \end{aligned}$$



유량을 계산하기 위한 셀 ij의 4개의 변

따라서, 시간 $(n+1)\delta t$ 에서의 속도성분과 단위질량당 에너지는 다음의 관계식을 이용해서 얻어진다.

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

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

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

여기서, E_{ij}^n 는 총에너지를 말한다. 비내부에너지(specific internal energy)는 다음의 관계식에서 얻어진다.

$$I_{ij}^{n+1} = E_{ij}^{n+1} - \frac{1}{2} (u^2 + v^2)_{ij}^{n+1}$$

3.2 변형 Simplified Enthalpy Arc Model

GCB의 소호실에 미치는 아크의 영향을 파악하는데는 정확한 아크변수를 구하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서, 압력과 온도에 따른 SF6 가스의 기체특성은 [2]를 참고하였으며, L.S.Frost & R.W.Liebermann의 Simplified Enthalpy Arc Model[3]을 도입·변경하여 아크를 다음과 같이 가정하고, 간략화 하였다.

- 1) 아크는 두 아크접점간의 길이를 가지며, 단위셀 기준으로 한 축대칭 원통형.
- 2) 아크압력 : 인접한 주위압력과 동일.
- 3) 아크온도 : 아크영역 전반에 걸쳐서 동일.
- 4) 가스는 노즐에서 축방향으로 일정한 압력경도 유지

위와 같은 가정을 바탕으로 해서, GCB내 아크의 모의 해석은 그림 1과 같은 순서로 아크영역을 차지하는 해당 셀에 단위체적당 열량을 대입하고, 주위 냉가스와의 유동해석을 실행하여 계산하였다.

일반적으로 아크반경은 다음 식(1)을 통해서 구한다.[4]

$$A = \left(\frac{2z(1-f)}{\rho h v_z \sigma} \right)^{1/2} \cdot I = \pi \cdot r_{arc}^2 \quad (1)$$

여기서, A = 아크단면적, z = 접점의 위치(아크길이), $(1-f)$ = 방사비 Fraction of the radiation emission coefficient < 2000A.

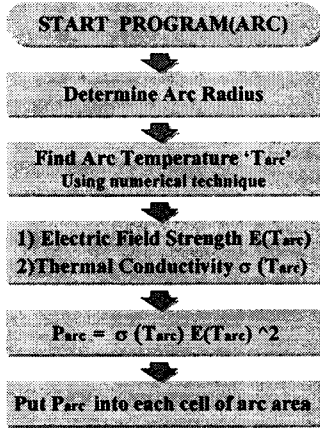


그림 1. GCB내 아크의 모의해석 흐름도

그런데, SF6가스 특성변수들은 모두 온도에 대한 함수 $\rho(T)$, $h(T)$, $\sigma(T)$, $f(T)$ 이기 때문에 아크반경을 얻기 위해서 식(1)을 사용하려면, 아크온도 T_{arc} 를 먼저 파악해야 하는 문제로 식(1)을 적용하기가 쉽지 않다.

대안으로서, 'J.J. Lowke & H.C. Ludwig' 발표자료[5]에서 실험을 통해 노즐목에서의 아크반경을 조사한 그래프(그림 2)를 이용하여 기지의 차단전류와 아크압력을 변수로 하는 식(2)에 바로 대입시키는 것으로 쉽게 아크반경을 얻을 수 있다.

$$\pi \cdot r_{arc}^2 = k \cdot (I/p)^{1/4} (I/10^3)^{1/2} / 2 \quad (2)$$

여기서, k = 비례상수, $l(z) =$ 두 점점간 길이(단위는 cm)
 $P =$ 아크압력(단위는 atm), $I =$ 아크전류.

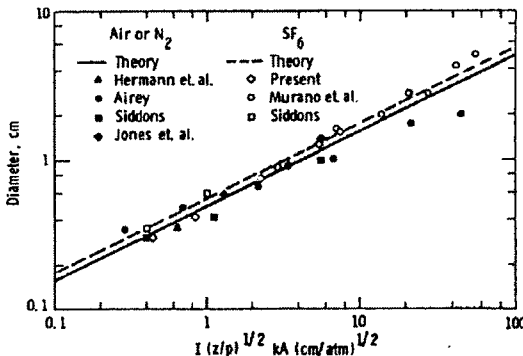


Fig 2. 실험을 통한 노즐목에서의 아크반경

다음으로, 주어진 아크압력하에서, Ohm의 법칙과 식(2)에서 얻어진 아크반경, 그리고 SF6가스특성을 이용하여, 식(3)으로부터 식(4)를 만족하는 아크온도를 수치해석적으로 반복연산과정을 수행하여 얻을 수 있었다.

$$\rho v \frac{\partial A}{\partial z} + A \frac{\partial(\rho h v)}{\partial z} = \frac{I^2(1-f)}{\sigma A} \quad (3)$$

$$f(T) = 1 - \frac{\text{output energy}}{\text{input energy}} = 1 - \frac{h \rho u A}{(1-f) \cdot V \cdot I} = 0 \quad (4)$$

여기서, 식(3)의 가스속도 $u(z)$ 는 가정 4)항에 의해서 다음의 식(5)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$M^2 = [2/(\gamma - 1)] [(P_o/P)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1] \quad (5)$$

단, $M =$ Mach Number, $P_o =$ 초기압력, $\gamma =$ 비열비

이상으로, 아크의 온도가 구해지면, 아크압력과 아크온도에 대응하는 아크의 전기전도도 $\sigma(T)$ 가 SF6가스 특성데이터를 통해서 얻어지므로, Ohm 법칙의 적용으로 아크저항, 아크전압을 구한다.

$$V_{arc} = \frac{l}{\sigma A} \cdot I, \text{ using } J = \sigma \cdot E \text{ or } E = \frac{I}{\sigma A}$$

따라서, Enthalpy Arc Model을 토대로 아크반경 r_{arc} , 아크온도 T_{arc} , 아크저항 R_{arc} , 아크전압 V_{arc} 의 여러 아크변수를 주어진 차단전류에 대해서 결정할 수 있었다.

마지막으로, 3.2절의 가정에 따라, 여러 아크변수들을 이용하여, 아크영역을 차지하는 해당셀에 차단전류에 의한 아크 발열량을 입력하기 위해, 2장 지배방정식중 에너지 보존방정식의 σE^2 항을 3.1.2절(첫번째 단계)의 내부에너지 \tilde{T}_{ii} 계산시에 적용하여 아크에너지를 해당셀상에 적용함으로써 고온의 아크를 형성하였다.

4. 열가스해석에 의한 GCB의 압력상승 계산

제안된 아크모델은 시간에 대한 차단전류치의 증감에 따라서 아크반경을 변화시키고, 아크반경의 변화를 고려한 아크의 발열량을 단위체적당 발열량으로 전환하여 각 해당 아크셀에 적용하였다.

그림 3은 계산에 적용한 정격 25.8kV 25kA 열팽창 분사식 가스차단기(GCB)의 단면그림으로, 차단부내 두 점점과 노즐, 그리고 열팽창실(arc chamber) 등 개극 초기 상태에서의 구성을 보여주고 있다. 본 시험의 GCB는 차단능력을 확보하기 위해 아크에너지를 이용하는 것이 필수적으로, 이 에너지에 의한 열가스를 차단부내 열팽창실로 유도하여 높은 압력을 유지하고, 차단시점에서 열팽창실의 상승된 압력을 이용하여 가스를 분출하는 자력기류발생(self-flow generation)으로 두 전극간에 발생하는 아크를 소호시켜 차단성능을 가지는 자력소호 가스차단기이다.

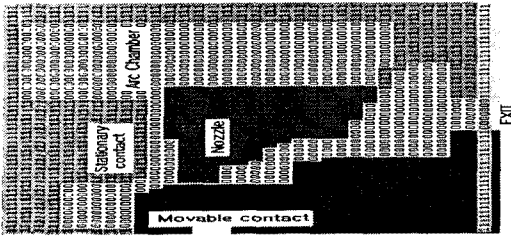
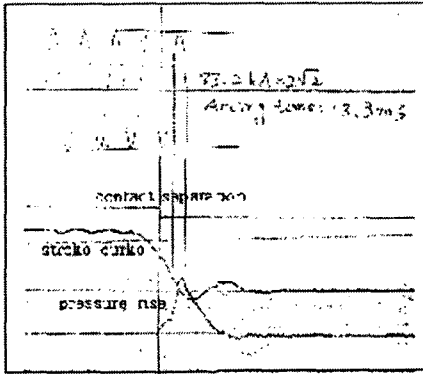
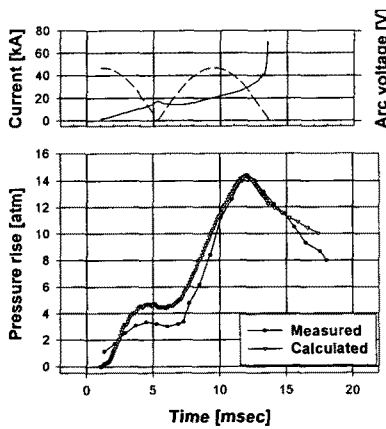


그림 3. 정격 25.8kV 25kA의 열팽창 분사식 GCB 단면

시험에서는 차단부내 초기압력으로 SF6가스 6.0bar 충전하고 차단전류 33.2kArms, 아크시간 13.3ms, 개극속도 2.0m/s의 조건으로 해서 열가스에 의한 GCB의 열팽창실내 압력상승을 측정하였다. 그림 4(a)는 대전류시험으로부터 얻은 차단시험 결과이며, 그림 4(b)는 전산 수치 해석을 통해 GCB내 대전류차단의 전과정을 모의해석한 열팽창실의 압력상승 결과이다.



(a) 대전류 차단시험에 의한 압력상승 측정결과



(b) 차단부내 열팽창실의 압력상승 해석결과

Fig 4. GCB의 차단시험에 의한 열팽창실의 압력상승 측정결과와 해석결과 비교

그림 5는 GCB가 차단전류(26kArms)에 의해 발생하는 아크를 소호하는 모의해석 과정을 아크변경 변화를 고려

해 보여주고 있다. 그림 5로부터 두 전극간의 아크소호 전과정을 살펴보면,

- 1) 개극초기에 두전극간에 발생하는 아크에너지는 아직 노즐을 빠져나오지 못한 가동접점의 노즐봉쇄로 인해 노즐 상류장에서 고온·고압의 열가스를 형성하고, 이 열가스는 노즐 상류장과 열팽창실간의 압력차로 열팽창실로 빠르게 흘러들어 열팽창실의 압력상승을 주도한다.
- 2) 개극후기인 가동접점이 노즐을 빠져간 이후는 스트로크에 의해 두 전극간에 거리가 증가하여 아크전압이 상승하고 아크반경이 더욱 확대되어 아크에 의해 노즐목이 봉쇄되어진다. 이 때, 노즐 상류장에서 발생하는 아크의 발열량은 아크자체의 노즐목 봉쇄로 상류장의 압력을 더욱 상승시켜 노즐목 봉쇄에 의한 열가스의 흐름을 반경방향으로 진행시키고 이로 인해, 개극초기와 같이, 열가스는 열팽창실로 빠르게 유입되어 팽창실의 압력상승을 지속적으로 유도하게 된다. 반면, 노즐을 벗어난 노즐 하류장 영역의 아크는 노즐 상류장으로부터 불려나오는 열기류에 의해 고온 열가스로 배기영역으로 빠져나간다.

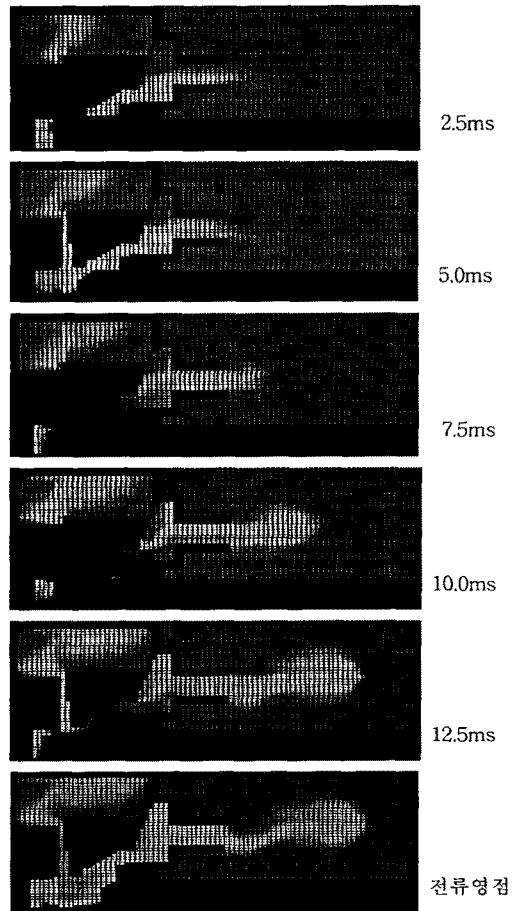


그림 5. GCB내 차단전류에 의해 발생하는 아크소호 전과정 모의해석(차단전류 = 26kArms)

또한, 그림 4와 그림 5로부터 다음과 같은 사실을 파악할 수 있었다.

- 대전류영역 : 노즐 상류장의 열가스는 열팽창실로 유입되는 과정에서 그림 6과 같은 열팽창실의 형상에 의해 그 흐름이 수직적으로 분사되지 못하고 우측으로 다소 기울어 진행된다. 이러한 열가스의 흐름에 의해 기존 냉가스는 열팽창실의 상단-좌측과 하단-우측으로 형성된다.

- 소전류영역 : 전류차단 1~2ms 전부터 전류의 감소에 따라 노즐목 봉쇄의 해제로 압력상승도 줄어들면서, 대전류영역에서는 열팽창실에 정체되어 상단-좌측과 하단-우측에 머물러 있던 냉가스가 열팽창실의 압력에 의해서 먼저 노즐 하류장으로 불려나온다. 이 때, 빠져나오는 냉가스 기류는 두 전극간의 아크를 소호냉각하여 전극간 절연회복특성을 향상시킨다. 반면, 열가스는 여전히 열팽창실에 머물러 있어 차단시점인 전류영점과 그 이후까지도 냉가스 분사의 구동력으로 제공된다. 이러한 기류의 움직임이 GCB가 전류영점에서 차단성능을 확보하는 주요한 원인이 되는 것으로 파악된다.

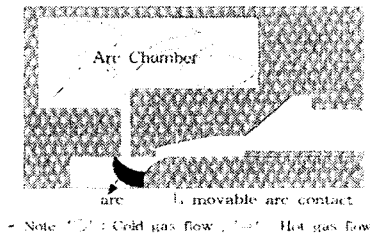


Fig 6. Concept of the arc quenching simulation

- 또한, 단락전류 차단시점인 전류영점직후 88 μ s(25.8 kV 25kA GCB의 IEC규격기준)에서의 GCB내 가동아크 집점 최선단의 온도는 1,700° K이하 정도이고, 선단부단에서 1,000~1,500° K의 온도분포를 나타내고 있다. 그런데, SF6가스는 약 1800° K이하까지는 이온·해리가 거의 발생하지 않는 가스특성을 가지고 있어 여전히 우수한 절연특성을 유지하고 있기 때문에, 가동아크집점 선단에서의 단락전류에 의한 절연회복특성은 전극간 전체의 세기를 적정히 조절할 경우, 높은 대전류 차단성능을 가질 수 있다. 그림 7(a)는 전류영점직전 0.5ms에서, 그림 7(b)는 전류영점에서, 그리고 그림 7(c)는 BTF차단시점인 전류영점직후 88 μ s에서의 차단부내 온도분포를 보여주고 있다(차단전류 = 26kArms). 이상의 내용은, 그림 4의 시험 결과에서, 정격 25.8kV 25kA GCB에 차단전류 33.2kA를 인가하여도 전류를 차단하는 양호한 성능시험 결과를 통해 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는, 아크를 포함하는 가스차단기내의 열가스해석이 가능한 유동해석 프로그램을 개발하고, 그 신뢰성을 파악하기 위해서 파퍼방식이 배제된 열팽창분사

식의 GCB를 모델로 선정하여, 시험 측정결과와의 비교를 통해 그 가능성을 평가할 수 있었다. 즉, 열팽창분사식 GCB는, 파퍼방식의 GCB와는 달리, 일체의 외부 가압 입력없이 전극간에 발생하는 아크로부터 파급되는 열전달에 의해 열팽창실의 압력상승을 주도하고 이를 통해 대전류 차단성능을 확보하기 때문에 압력 측정치와의 비교로 아크모의해석의 신뢰성 확인이 가능하다.

변형 Simplified Enthalpy Arc Model을 토대로 개발된 본 기법은 시험 측정치와의 양호한 결과를 나타내었으며, 대전류 차단과정의 가시화로 보다 쉽게 관련현상을 이해하고, 제품개발시 최적의 설계를 도출하는데 유용한 도구가 될 것으로 여겨진다.



(a) 전류영점직전 0.5ms



(b) 차단전류영점 0.0ms



(c) 전류영점직후 88 μ s

그림 7. 전류영점 직전·후 GCB 차단부내 온도분포 (차단전류 = 26kArms)

[1] Y.Ueda, H.Sasao, Y.Mural, K.Yoshinaga, S.Tominaga "Self-flow generation phenomena in a gas circuit breaker without puffer action", IEEE trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No.8, pp 3888-3898, 1981
 [2] R.A Gentry, R.E Martin and B.J Daly, "An Eulerian differencing method for unsteady compressible flow problems", J.Comp.Phys.v.1, pp 87-118, 1966
 [3] L.S Frost and R.W Liebermann "Composition and transport properties of SF6 and their use in a simplified enthalpy flow arc model", Proc. IEEE, 59(4), pp.474-485, 1971
 [4] Y.Ueda, T.Miyamoto, T.Nitta, and T.Ito, "Dynamic behavior of high-current arcs in a capillary", J.Appl.Phys Vol.47, No.9, pp3880-3887, 1976
 [5] J.J Lowke, H.C Ludwig, "A simple for high current arcs stablized by forced convection", Journal of Applied Physics, Vol.46, No.8, pp 3352-3360, 1975.
 [6] C.B Ruchti and L.Niemeyer, "Ablation controlled arcs", IEEE Trans. on Plasma Science v. PS-14, pp.423-434, 1986