

## 초고압 GCB 소호부내의 열가스 유동해석

송기동, 박경엽, 이병윤  
한국전기연구소 스위치기어연구팀

### Analysis of the hot gas flow field in a interrupter of UHV GCB

K.D. Song, K.Y. Park, B.Y. Lee.  
KERI, Switchgear Research Team

**Abstract** - This paper presents an arc(hot-gas flow field) analysis method in GCB. This method includes the Lorentz's force due to magnetic field, turbulent viscous effect and radiation heat transfer which are indispensable to the analysis of hot-gas flow.

To verify the applicability of the proposed method, steady state hot-gas flow analysis within a simplified interrupter has been carried out. Inlet boundary pressure values were assumed to be 9.0atm and 12.0atm. For each inlet boundary condition, three cases of hot-gas flow field analyses were performed according to the values of arc currents which were assumed to be D.C 0.6kA, 1.0kA and 2.0kA.

The results revealed that the arc radius at nozzle throat has been concentrated by increasing the pressure of nozzle upstream and that the maximum temperature of arc core has been decreased along to nozzle exit and the high temperature region come to be wide in nozzle downstream. From these results, it is confirmed that the proposed method will be applicable to predict the large current interruption capability of GCB.

## 1. 서 론

초고압 가스차단기의 차단성능을 검증하기 위해, 국내는 물론 국외에서도 경쟁적으로 차단부내의 유동해석에 대한 해석기법 및 프로그램 개발에 주력해 오고 있다.

국내의 경우, 차단부의 냉가스 유동해석기법 및 프로그램은 1993년부터 개발을 시작하여 현재 완성 단계에 이르고 있으며, 열가스 유동해석기법은 기본적인 적용단계에 있다. 지난 5년동안 개발된 냉가스 유동해석기법은 현재 초고압 가스차단기의 소전류 차단성능을 평가하는데 적극적으로 활용되고 있고, 해석결과에 대한 정확도와 신뢰성을 확보하고 있다[1]. 하지만, 열가스 유동해석의 경우 소호부내의 아크현상이 대단히 복잡하여 아크현상에 대한 물리적인 이해, 프로그램 작성을 위한 수식화 또는 아크모델의 개발 등 많은 문제점들을 갖고 있다. 또한, 그 해석기법은 외국의 각 기관에서 차단기 설계의 핵심수단으로 보호되고 있기 때문에, 해석기법을 확보하기도 어려울 뿐만 아니라 해석기법을 완성한 연구기관도 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 가스차단기에 있어서 아크를 포함한 기본적인 열가스 유동해석기법 및 적용에 대해 설명하고 있다. 간단한 소호부내의 열가스 유동해석을 위해 상용 CFD 프로그램인 "Phoenix"에 아크모델을 접목시켰고, 비록 정상상태로 아크를 해석하였지만 전류 크기에 대한 아크반경, 아크온도, 아크에너지 등 아크 파라미터를 포함하고 있다. 또한, 상온에서 30000(K)까지의 온

도에 대한 SF<sub>6</sub>가스의 특성치를 데이터 베이스화 하여 전도(conduction), 대류(convection), 방사(radiation)의 열전달을 포함하고 있으며, 아크 자체의 전류에 의한 전자력(Lorentz's force)도 고려하고 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 차단부내 유동해석의 종류와 적용

초고압 파퍼형 가스차단기의 차단원리를 그림 1에 간략히 설명하고 있다. 전력계통에 고장이 발생하면, 고장 전류에 의해 여자된 트립(trip) 코일은 조작기의 스위치를 동작시키고, 조작기는 조작로드를 통해 그림 1의 빗금친 가동부를 왼쪽으로 이동시킨다. 가동부가 이동함에 따라 파퍼실린더내의 SF<sub>6</sub>가스는 피스톤에 의해 압축되고, 아크점점은 분리되며, 분리된 아크점점 사이에는 아크가 발생하게 된다. 파퍼실린더에서 압축된 가스는 노즐을 통해 아크로 분사되어 아크를 소호하게 되고, 아크가 소호된 직후 두 접점사이에는 과도회복전압(TRV)이 인가되며, 이 전압에 견디기 위해서는 소호부(노즐과 가동 및 고정아크점점 부위)에 남아 있는 열가스를 신속히 배출시키고 냉각시켜 절연성을 회복해야 한다. 이러한 과정이 재점화(reignition)없이 수행될 경우, 비로소 차단기는 고장전류를 차단하게 된다.

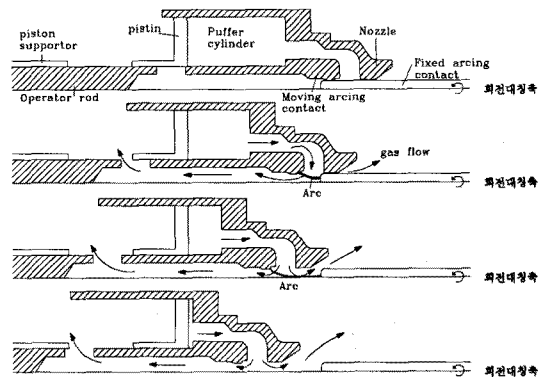


그림 1. 초고압 파퍼형 가스차단기의 동작원리.

차단부내의 유동해석은 무부하시의 냉가스 유동해석과 아크가 존재하는 유부하시의 열가스 유동해석으로 나누어진다.

냉가스 유동해석의 결과는 노즐형상, 아크점점의 형상, 개극속도 등을 결정하고, 최종적으로 진상소전류와 같은 차단부의 소전류 차단성능을 평가하는 데 활용된다. 열가스 유동해석의 결과는 열가스의 냉각, 배출 등을 고려하여 노즐형상 등 소호부의 형상을 결정하는 데

활용되며, 최종적으로 단자단락고장(BTF: bus terminal Fault)과 근거리선로고장(SLF: short line fault)시의 대전류 차단성능을 평가하는 데 활용된다.

## 2.2 차단부내 유동해석상의 문제점들

새로이 설계된 또는 기존의 차단기의 차단성능을 평가하기 위해서는 냉가스 유동해석과 열가스 유동해석이 반드시 필요하다. 하지만, 차단부내 유동해석을 하는 데 있어서 다음과 같은 쉽지 않은 문제점들이 있다.

### i) 가동부의 이동을 모의하는 문제 :

자체개발한 프로그램 또는 상용 CFD프로그램을 이용하여 차단부내의 유동해석을 하는 경우, 가장 기본적인 문제는 차단부의 이동을 모의하는 것이다. 계산상의 편리함을 위해 실제와는 다르게 가동부가 움직이는 것 대신에 고정부인 피스톤과 고정아크접점이 움직인다고 가정하더라도 계산격자의 이그러짐과 계산과정의 비수렴성(divergence)을 피하기 어렵다(그림 1 참조).

### ii) 고정아크접점 곡률의 모델링 문제 :

고정아크접점의 선단부분은 가스밀도가 가장 급격히 변하고 전계강도가 크게 나타나므로, 차단기의 소전류 차단성능을 파악하는 데 있어서 가장 중요한 부분이다. 따라서, 고정아크접점 선단의 곡률부분에 대해 시간축에서 이동하면서 이그러짐없이 계산격자를 형성시켜 주어야 한다.

### iii) 아크반경, 아크에너지 등 아크 파라미터를 표현할 수 있는 지배방정식(governing equation)의 결정과 아크에 의한 소호가스(SF<sub>6</sub>가스) 특성치의 변화를 고려하는 문제 :

소호부내의 아크 파라미터를 표현하는 아크모델의 개발이 필요하며, SF<sub>6</sub> 가스의 온도에 대한 물리적 특성치를 데이터 베이스화 하여 아크와 소호가스 사이의 상호 교류를 표현할 수 있는 있어야 한다.

### iv) 아크가 존재하는 경우, 유동 파라미터의 불연속성 발생과 비선형 지배방정식의 수렴문제 :

아크가 존재하는 경우, 유동 파라미터의 불연속이 발생하여 연속방정식을 만족시키기 어려우며, 아크모델을 접목시켜 전도, 대류, 방사와 같은 열전달 과정을 동시에 해결하는 것은 용이하지 않다. 또한, 아크에너지의 지배방정식의 비선형성 때문에 계산의 수렴이 어려우며, 아크전류 자체에 의한 전자기력도 고려하여야 한다.

### v) 아크에 의한 아크접점의 용삭(melting)과 노즐의 용삭(ablation)의 모델링 :

차단부내 유동해석의 최종단계로 아크에 의한 아크접점의 용삭(melting)과 노즐의 용삭(ablation)을 고려하여야 하며, 특히 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 아크열에 의한 SF<sub>6</sub>가스의 화학적 변화까지 고려하여야 한다.

### vi) 해석결과와의 검증 :

이상과 같이 아크를 포함한 열가스 유동해석을 성공적으로 수행한다 하더라도, 해석결과를 검증하기 위한 아크 파라미터의 측정은 어려운 문제이다.

위 문제들중 i)항과 ii)항은 참고문헌[2]에서 이미 대략적으로 해결하였으며, 본 논문은 iii)항과 iv)의 문제에 대해 검토한 것이다.

## 2.3 지배방정식 및 열가스 유동해석

### 2.3.1 지배방정식

본 연구에서 사용된 아크모델은 참고문헌 [3],[4]에서 언급한 아크모델을 근거로 하고 있으며, 대전류 아크

에 의해 자체로 형성된 전자기력(electromagnetic force)의 영향, 아크와 충격파(shock)의 상호작용, 초음속 노즐에서 아크에 대한 난류의 모델링을 고려하고 있다.

원통형 축대칭 좌표계에서 난류를 고려한 지배방정식들은 다음과 같다.

Continuity :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

z-Momentum :

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \rho v w - r (\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho w^2 - (\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial z}] = S_w \quad (2)$$

r-Momentum :

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \rho v^2 - r (\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho w v - (\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial z}] = S_v \quad (3)$$

Energy(enthalpy) :

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \rho v h - r \left\{ \frac{(k + k_t)}{c_p} \right\} \frac{\partial h}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho w h - \left\{ \frac{(k + k_t)}{c_p} \right\} \frac{\partial h}{\partial z}] = S_h \quad (4)$$

차단기내의 가스유동은 대개 축방향성분이 지배적이며, 열가스에 미치는 중력을 무시한다. 각 식들의 원항(source term)들 S<sub>w</sub>, S<sub>v</sub>, S<sub>h</sub>는 다음과 같으며, 전자기력, 난류, 방사, 주열열(Ohmic's Heat)의 영향을 고려한 것이다.

$$S_w = -\frac{\partial P}{\partial z} + (\vec{J} \times \vec{B})_z \quad (5)$$

$$S_v = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r (\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial z} [(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial r}] - \frac{\partial \mu V}{r^2} + (\vec{J} \times \vec{B})_r \quad (6)$$

$$S_h = \frac{dP}{dt} + \sigma E^2 - q + \Phi \quad (7)$$

식(7)에서  $\Phi$ 는 층류(laminar)와 난류(turbulent) 점성효과(viscous effect)에 의한 에너지 소산(energy dissipation)을 나타낸다.

$$\Phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r (\mu + \mu_t) w \frac{\partial w}{\partial r}] \quad (8)$$

난류점성도  $\mu_t$  및 난류열전도도  $k_T$ 는 프란틀 혼합길이 모델(Prandtl mixing length model)을 사용하여 구할 수 있으며[5], 단위체적 및 시간당 순방사 손실(net radiation loss)  $q$ 는 참고문헌 [6]의 방사모델을 사용하였다. 온도 및 압력의 함수인 SF<sub>6</sub>가스의 열역학 및 수송계수들은 참고문헌 [7]의 자료들을 데이터 베이스

스화하여 적절한 위치에서 사용하였다.  
위의 지배방정식에 사용된 문자들의 의미를 표 1에 나타내고 있다.

r: 반경방향 좌표	$\rho$ : 밀도
z: 축방향 좌표	$\mu, \mu_t$ : 층류, 난류 점도
v: 반경방향 속도	$K, K_t$ : 층류, 난류 열전도도
w: 축방향 속도	$C_p$ : 정압비열
J: 전류밀도	$\sigma$ : 전기전도도
B: 자속밀도	E: 전계
q: 단위 체적 및 시간당의 순방사 손실	
P: 압력	

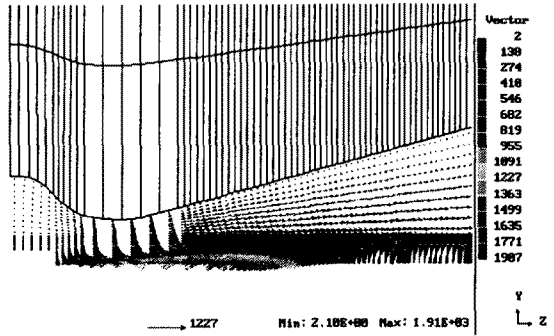


그림 4. 열가스의 속도분포.

### 2.3.2 적용 및 경계조건

위의 아크모델을 적용하기 위해 그림 2와 같은 계산 격자를 가진 소호부를 고려하였다.

이 모델에서는 아크를 소호부내에서 정상상태(steady state)로 해석하며, 자계에 의한 Lorentz force를 고려하고 있다. 또한, 난류모델은 Prandtl mixing length model을 사용하고 있으며, 추격파를 포획하기 위해 대류항을 보정하고 방사전달을 고려하고 있다.

그림 2의 우측변에는 압력조건(pressure outlet boundary)으로 3.0[atm]이 주어져 있고, 좌측변의 노즐과 접점사이에 유입조건(pressure inlet boundary)으로 9.0[atm]과 12.0[atm]의 두가지 경우에 대해서 살펴보았다. 아크 전류크기는 0.6, 1.0, 2.0[kA]의 세가지 경우에 대해서 열가스 유동해석을 실시하였고, 한가지 경우에 대해서 총 6000번의 반복계산(sweep number)이 수행되었다.

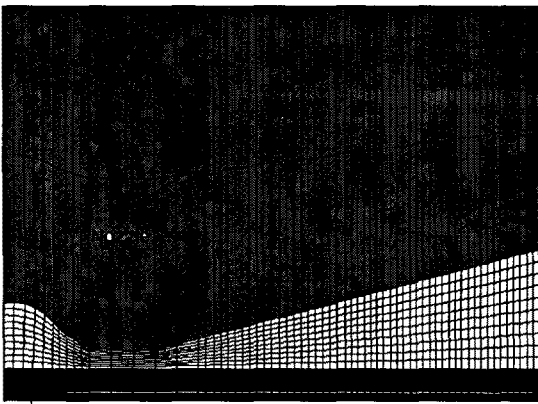


그림 2. 해석영역 및 계산격자.

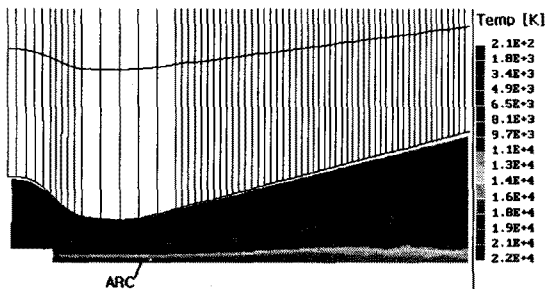


그림 3. 소호부내 온도분포 해석결과 (I=0.6kA).

그림 3과 4는 계산결과 하나의 예로 전류크기 0.6[kA]일 때 소호부내에서의 온도분포와 속도분포를 각각 나타내고 있다.

일반적으로 차단부내의 냉가스의 경우 마하수(Mach no.)가 2.2~2.5의 값을 나타내지만, 그림 4에서 아크 중심에서의 열가스 속도는 초음속 차원을 넘어 마하수가 거의 15.0에 이르고 있다.

그림 5에는 등전위(equi-potential) 분포도를 나타내고 있다. 이 모델에서는 유동해석에서 사용된 계산격자를 이용하여 전계해석도 동시에 계산한다.

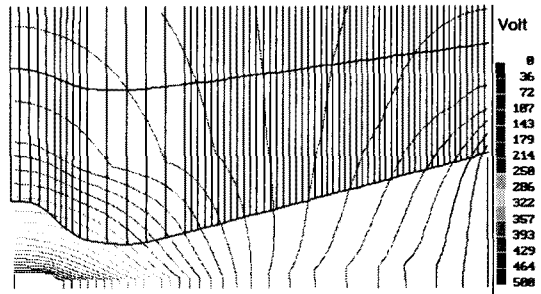


그림 5. 등전위 분포도.

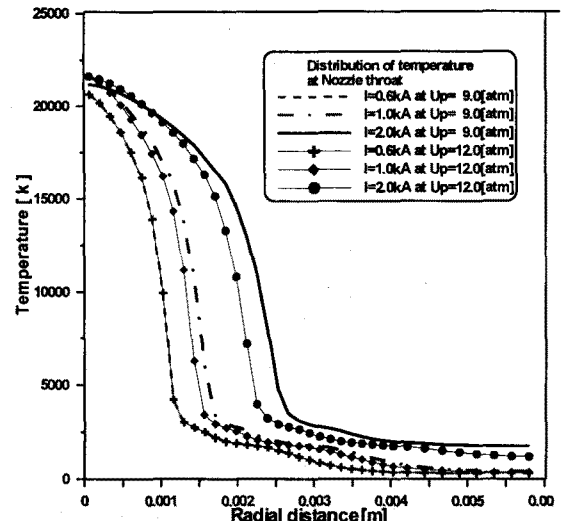


그림 6. 노즐목에서 유입조건에 따른 아크반경의 변화.

**[참 고 문 헌]**

그림 6은 노즐목에서 유입조건에 따른 아크반경의 변화를 보이고 있다. 즉, 압력이 높아짐에 따라 아크를 반경방향으로 압축하는 힘이 증가하여 아크반경이 다소 줄어드는 것을 볼 수 있다.

그림 7에는 상류장의 조건이 동일한 경우, 노즐목과 노즐하류장 영역에서의 온도분포를 비교하고 있다. 노즐목에서 반경방향으로의 온도변화는 급격히 나타나고 있으며, 노즐하류장 쪽으로 갈수록 중심부의 최대온도는 낮아지고 온도변화가 완만해짐을 알 수 있다. 특히, 전류크기가 2.0[kA] 이상이 되면서 고온영역이 넓게 분포하는 것을 알 수 있다.

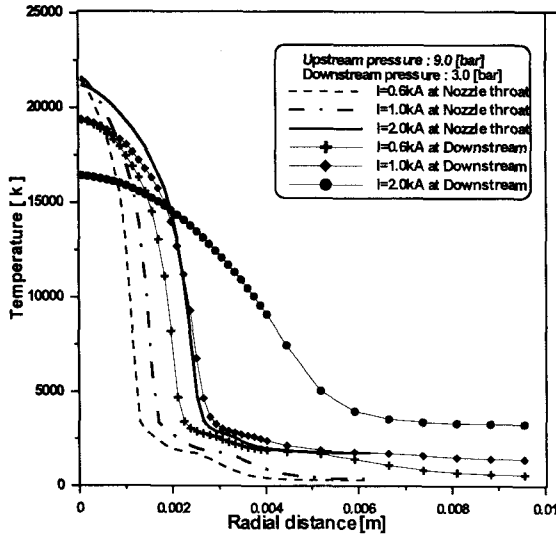


그림 7. 노즐목과 노즐하류장에서의 온도분포 비교.

**3. 결 론**

본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 비록 차단부의 개극동작을 모의하지 않고 소호부내에서 정상상태로 아크해석을 수행하였지만, 자계에 의한 전자기력, 난류모델의 적용, 방사열전달 등 열가스 유동해석에서 필수적으로 고려해야 하는 사항들을 거의 전부 포함하여 소호부내에서의 열가스 유동해석을 성공적으로 수행하였다.
- 2) 노즐상류장의 압력이 증가할수록 노즐목에서의 아크반경은 줄어들고, 노즐하류장쪽으로 갈수록 아크중심부의 최고온도는 낮아지면서 고온영역이 넓게 분포한다는 것을 확인하였다. 이러한 결과들은 본 연구에서 적용한 아크모델 및 해석기법이 매우 유용하다는 것을 입증하는 것이라 하겠다.
- 3) 현재 본 아크모델에 노즐용사를 고려하는 것을 연구 중이며, 냉가스 유동해석에서 이미 개발된 차단부의 개극동작 모의기법[2]과 본 연구의 열가스 유동해석 기법을 접목할 경우, 차단부내에서의 완전한 아크해석은 물론, 차단부의 소전류 차단성능과 아울러 대전류 차단성능도 미리 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 산업자원부지원 중기거점 기술개발과제인 "초고압 전력기기 기초 설계기술 개발"로 수행한 연구결과임.

- [1] 송기동, 박경엽, 오연호 외, "소호부 형상 및 파퍼실린더 압력상승에 따른 소전류 차단성능", 대한전기학회 경남지부, 제3회 전력기기 symposium 논문집, pp19~23, 4.1999.
- [2] 송기동, 박경엽, 신영준 외, "상용 CFD CODE를 이용한 초고압 GCB 냉가스 유동해석", 1998년도 대한전기학회 전력기기연구회 춘계 학술발표회 논문집, pp131~136, 1998.
- [3] 박경엽, 송기동, 신영준 외, "SF6 파퍼차단기의 수학적 모델링 I: 대전류영역", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집(B), pp640~644, 1993.
- [4] 박경엽, 송기동, 신영준 외, "하이브리드 아크모델을 이용한 초고압 가스차단기의 아크특성 해석", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집(A), pp94~96, 1997.
- [5] M.T.C. Fang et al., "Current-zero behaviour of an SF6 gas-blast arc. 2. Turbulent flow", J. Phys. D, Vol. 27, pp74~, 1994.
- [6] J.F. Zhang et al., "Theoretical investigation of a 2kA DC nitrogen arc in a supersonic nozzle", J. Phys. D, Vol. 20, No. 3, pp368~, 1987.
- [7] L.S. Frost and R.W. Liebermann, "Properties of SF6 and their use in a simplified enthalpy flow model", Proc. IEEE, Vol. 59, pp474~485, 1971.