

노즐용삭을 고려한 초고압 가스차단기의 압력상승 해석

김흥규*, 송기동*, 박경엽*, 배채운**, 정현교**, 박순규***, 이봉희***
 한국전기연구원*, 서울대학교**, 한국전력공사 중앙교육원***

Analysis of Pressure Rise in Gas Circuit Breakers Considering Nozzle Ablation

H.K. Kim*, K.D. Song*, K.Y. Park*, C.Y. Bae, H.K. Jung**, S.K. Park***, B.H. Lee***
 KERI*, Seoul National University**, KEPCO Central Education Institute***

Abstract - 열팽창 방식의 가스차단기는 아크 에너지 자체를 이용하여 압력상승을 얻고, 상승된 압력을 이용하여 전류 영점 부근에서 아크 방향으로의 유동을 형성하여 아크를 소호한다. 대전류 구간에서 노즐 폐색현상이 일어나면 노즐 용삭이 크게 일어나며 용삭된 노즐 물질은 팽창실의 압력과 온도를 상승시키게 된다. 따라서 차단 특성해석을 위해서는 노즐 용삭에 의한 압력 상승 해석이 필요하다. 본 논문에서는 아크에너지에 따른 노즐 용삭비를 이용하여 용삭되는 노즐량을 계산하고, 이로 인한 back flow 현상을 고려한 해석 방법을 제안한다. 개발된 프로그램을 제작한 차단부 모델에 적용한 결과, 열팽창실의 압력상승치는 시험결과와 잘 일치함을 확인하였다.

1. 서 론

열팽창 방식의 가스차단기는 콤팩트한 크기와 저조작력의 장점 때문에 근래에 초고압 차단기의 주류가 되고 있다. 이 타입의 가스 차단기에서는 아크 에너지가 팽창실로 전달되며 노즐 폐색기간 동안에 팽창실의 압력상승을 유발한다. 상승된 압력은 전류 영점 부근에서 극간의 아크로 강한 유동을 형성하여 아크를 차단하게 되며, 아크 전류의 크기가 클수록 더 큰 소호압력을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 팽창실 내의 압력상승 해석을 위해서 차단부의 형상을 정확히 고려하면서도 계산 시간을 줄이는 해석 방법을 제시하고, 해석 결과를 시험결과와 비교한다. 노즐 용삭량은 아크 에너지에 비례하는 것으로 가정하였으며, 노즐 용삭은 노즐 폐색이 일어나는 기간에만 고려하였다. 해석된 열팽창실의 압력 상승치는 시험결과와 잘 일치하며, 본 해석 방법은 열팽창 방식의 차단부 설계에 많은 도움이 될 것이다.

2. 열팽창 방식 차단부의 아크 소호 원리

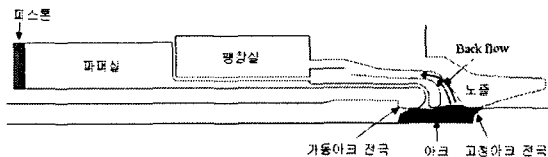


그림1. 복합소호 방식(열팽창+파괴) 차단부 구조

그림1은 열팽창 타입과 파괴 타입의 원리를 동시에 적용한 복합소호 방식 차단기의 차단부 구조를 보여 준다. 접점이 분리되어 전극 사이에 아크가 발생되며, 아크가 노즐 목을 봉쇄하는 노즐 폐색(nozzle clogging)현상이 일어나면 아크 에너지에 의해 노즐 용삭이 일어나고 용삭된 물질은 노즐 부근의 높은 정체압력으로 인하여 팽창실로 전달되게 된다. 이로 인하여 고온의 아크 에너지

는 용삭된 노즐 물질과 함께 팽창실로 전달되고, 팽창실로 흘러간 열가스는 냉가스와 혼합과정을 거치며, 열가스의 압축에 의해서 팽창실의 압력이 상승하게 된다. 아크 전류가 감소하여 전류 영점부근으로 떨어지면 노즐 용삭이 없어지고 노즐부근의 압력이 급격히 낮아지게 된다. 그리고 노즐 부근의 압력이 팽창실 압력보다 낮게 되면 팽창실의 압축된 가스가 극간의 아크로 흘러가서 아크를 소호하게 된다.

열팽창 방식 차단기의 아크 소호능력은 팽창실의 압력상승과 밀접한 관련이 있기 때문에 차단성능 해석 시에 유부하 압력 상승 해석이 매우 중요하다. 특히 노즐 용삭 물질이 팽창실의 압력 상승에 큰 영향을 미치기 때문에 노즐 용삭을 고려한 유부하 압력 상승 해석은 필수적이다. 팽창실에서의 용삭된 노즐물질과 냉가스의 혼합 과정에 대한 연구는 많이 진행되고 있으며, 특히 CFD 계산 코드에 노즐 용삭가스의 효과를 고려한 해석을 통해 압력상승 과정과 열가스와 냉가스의 혼합과정에 대한 해석을 하고 있다[1-3]. 이러한 CFD 코드의 계산은 입력 데이터의 작성 및 초기 조건 설정이 복잡하며 계산시간도 길기 때문에 차단부 구조, 아크 전류, 용삭량 등의 여러 파라미터를 변경하면서 해석하기에는 불편하다. 이런 불편한 점을 극복하기 위해서 팽창실과 가스 유로를 몇 개의 단일셀로 구분하여 아크 에너지와 노즐 용삭을 고려한 해석 방법이 제안되었다[4-5].

이 방법은 아크 에너지에 의한 노즐 용삭량을 계산하여 용삭된 양의 일부가 팽창실로 역류하도록 하였으며 아크 에너지와 노즐 용삭의 영향을 아크 영역에 가장 가까운 부분의 경계조건으로 처리하여 계산상의 편의를 추구하고 해석 시간을 줄이도록 하였다. 하지만 이 방법은 가스 유로를 몇 개의 셀로만 나누었기 때문에 실제 차단부 형상을 고려할 수 없으며 셀의 수가 작기 때문에 국부적인 유동 현상을 해석 할 수 없다. 즉 팽창실에서의 평균 압력 변화는 해석이 가능하지만 팽창실 내에서의 열가스와 냉가스의 혼합 과정, 노즐 형상에 따른 압력 상승 변화 등 차단과정에 중요한 영향은 해석할 수가 없다.

3. 팽창실 압력 상승 해석

본 연구에서는 노즐 폐색현상은 아크 직경이 노즐목 직경보다 큰 경우에 일어난다고 가정한다. 따라서 아크 전류에 따른 아크전류 밀도계산이 필요하다. 아크 전류는 enthalpy flow arc model[5]에 의해서 다음의 식으로 계산한다.

$$J_{arc} = 7.5 - 3.5 \exp((\alpha - 1)\beta) \quad [kA/cm^2] \quad (1)$$

여기서 α = 초기압력/아크영역압력 비를 나타내며, β 는 10을 사용하였다.

아크 전류로부터 구하여진 아크 반경이 노즐목 반경보다

크면 노즐 폐색현상이 일어나며, 이 때 용삭되는 노즐 물질량은 아크 파워에 비례하는 것으로 한다. 즉

$$m_{ablated} = \theta | V_{arc} \times I_{arc} | \quad [kg] \quad (2)$$

이며, 여기서 θ 는 용삭율을, V_{arc} , I_{arc} 는 각각 아크 전압과 아크 전류이다. 아크 전류는 시험 시의 전류 파형이므로 직접 알 수 있지만 아크 전압은 일정하다고 가정하였다.

본 논문에서 해석을 위한 기본방정식으로는 다음의 축대칭 식을 이용한다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot F = S \quad (3)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho \vec{U} \\ \rho u \vec{U} \\ \rho v \vec{U} \\ \rho E \vec{U} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\partial P}{\partial z} \\ -\frac{\partial P}{\partial r} \\ -\nabla \cdot (\rho \vec{U}) + S_e \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 ρ [kg/m³]는 밀도, $\vec{U} = (u, v)$ [m/s]는 축방향 및 반경방향 속도 성분, E [J/kg]는 비총에너지(specific total energy), P [N/m²]는 압력, S_e [J/kg·sec]는 에너지 소스 항을 나타낸다.

식(3)을 풀기 위해서 유한 체적법에 의한 해석 기법을 적용하였다[6]. 그림2는 해석을 위한 격자의 예를 보여준다. 본 연구에서는 팽창실에서 열가스와 냉가스의 혼합 과정을 고려하기 위해서 팽창실 및 파퍼실 영역도 다수의 셀로 분할하였으며, 아크 반경에 따른 유동 특성을 고려하기 위해서 고정아크 전극 영역과 가동아크 전극 영역을 몇 개의 셀 층(cell layer)로 나누었다.

용삭된 노즐 물질 중 일부는 아크 영역의 좌우측 부분으로 이동하고, 일부가 열가스와 함께 팽창실로 들어가서 팽창실을 압축하게 된다. 용삭된 질량 중 팽창실로 흘러가는 양을 계산 셀에 추가하기 위해서 그림3과 같이 아크 영역과 팽창실 유로에 인접한 몇 개의 셀 층에 위치한 셀들에 질량을 나누어 추가하였다. 그림3의 아크 영역 셀은 몇 개의 층으로 나누어져 있으며, 식(1)에서 계산된 아크 전류밀도로부터 아크 반경을 계산하여 아크 반경보다 큰 반경에 위치한 셀들은 가스 영역으로 설정하고, 아크 영역의 셀은 유동의 흐름이 없는 것으로 가정한다. 이는 아크 영역은 20,000K이상의 고온 플라즈마 상태이고 밀도가 매우 낮기 때문에 질량 유동이 냉가스의 경우에 비해 무시할 만하기 때문이다.



그림2. 해석 격자

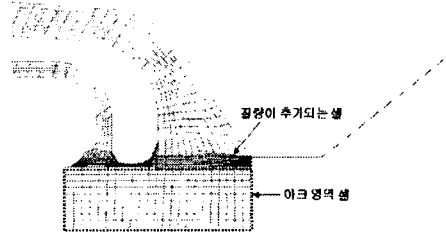


그림3. 질량이 추가되는 셀 영역 및 아크 영역 셀

4. 사례 연구 및 결과 검토

제안된 해석 알고리즘을 실제 제작한 차단부 모델에 적용하여, 열팽창실의 압력 상승치를 비교하였다. 그림 4는 해석을 위한 차단부 모델이며, 열팽창실과 파퍼실이 병렬로 구성된 구조의 복합소호 방식이다. 그림 5는 그림4의 팽창실에 "Sensor" 위치에 압력 센서를 설치하여 측정된 압력 상승치와 같은 지점에서 해석에 의해 구하여진 결과를 비교한 것이다. Sim1의 경우는 전류 피크치가 36kA인 경우이며, Sim2는 36×1.5 kA인 경우에 대한 해석결과이다. 전류가 36 kA인 경우의 해석 결과는 시험 결과와 매우 잘 일치하며, 전류가 1.5배 증가한 경우의 압력 상승치는 노즐 용삭량이 증가하여 최대 압력 상승치는 약 2배정도 높아졌다. 이로부터 열팽창실을 가진 차단부 구조에서 팽창실의 압력 상승에 노즐 용삭이 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

그림 6은 시간에 따른 마하수 분포 및 유동의 흐름을 보여준다. 그림 (a),(b)에서 아크의 영향에 의해 발생한 back flow가 팽창실로 흘러감을 볼 수 있고 (c)에서는 상당한 vortex가 형성되고 있다. 그림(d)는 전류 영점 직전의 유동의 흐름을 보여주며, 전류 영점 부근에서 아크 에너지가 급속히 감소하여 노즐 용삭 영향이 현저히 줄어들고 노즐 부근의 압력이 급격히 감소하여 팽창실의 압력이 노즐목 부근의 압력보다 높아져서 극간의 아크 방향으로 유동이 형성됨을 볼 수 있다. 이러한 유동은 전류 영점 부근에서 아크를 소호하는 데 매우 유효하다.

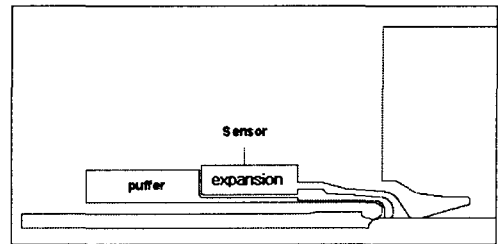


그림4. 해석 모델 및 해석 영역

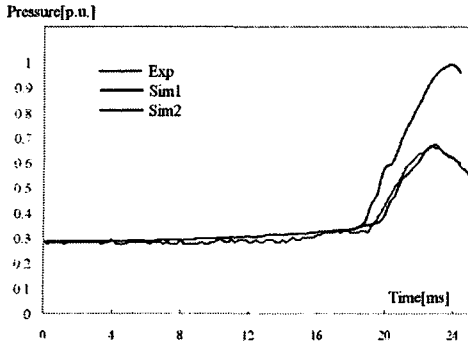
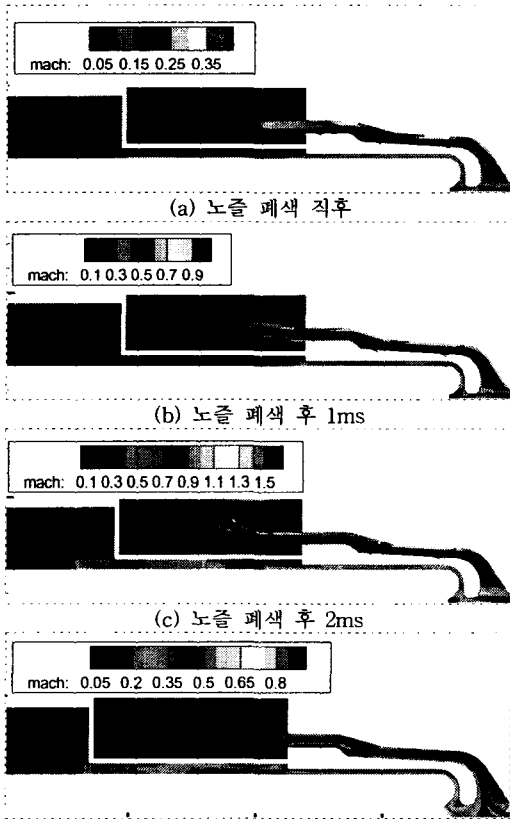


그림5. 열팽창실 압력 상승 비교



(d) 전류 영점 직전
그림6. 시간에 따른 유동 분포

5. 결 론

본 논문에서는 아르케너지에 따른 노즐 용삭비를 이용하여 용삭되는 노즐량을 계산하고, 이로 인한 back flow 현상을 고려하여 유부하시의 팽창실 내의 압력 상승 해석을 위한 방법을 제안하였다. 해석 시간이 짧고 노즐 용삭을 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 본 해석 방법은 팽창실 구조를 가지는 다양한 차단부 해석 및 설계에 유용하게 활용될 수 있다. 개발된 프로그램을 제작한 차단부 모델에 적용한 결과, 열팽창실의 압력 상승치는 시험결과와 잘 일치함을 확인하였다.

6. 참고 문헌

- [1] M Claessens, *et al.*, "A computational fluid dynamics simulation of high- and low-current arcs in self-blast circuit breakers", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30, pp.1899-1907, 1997
- [2] P Chevrer, *et al.*, "Industrial applications of high-, medium- and low-voltage arc modelling", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30, pp.1346-1355, 1997
- [3] M. Claessens, *et al.*, "Simulation of gas flow phenomena in high-voltage self-blast circuit breakers at heavy fault current interruption", *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, Vol.25, No.5, p.1001-1007, 1997
- [4] N. Ohsawa and Y. Yoshioka, "An analysis of Blast pressure rise in gas circuit breaker by a single molecule gas model taking nozzle ablation into consideration", *Trans. on IEE Japan*, vol.121-B, No.1, pp.88-94, 2001
- [5] N. Ohsawa and Y. Yoshioka, "The calculation method of puffer pressure in SF6 gas circuit breaker taking real gas effect into account", *IEE Japan Conference on Switching and Protecting Engineering, ED-01-186, SP-01-31, HV-01-85*, pp.45-50, 2001
- [6] 배채운, "FVM을 이용한 차단기 내의 열가스 수치 해석", 서울대학교 석사학위 논문, 2001