

초고압 가스차단부 아크 해석

Arc Analysis of Extra High Voltage Gas Circuit Breaker

이병윤, 박경엽, 송기동
(B.Y. Lee, K.Y. Park, K.D. Song)

Abstract

이 논문에서는 대전류 차단과정에 가스차단기의 차단부내에서 발생하는 아크를 해석하기 위한 기법을 기술한다. 차단부내에서 아크 및 아크에 의해 가열된 가스의 흐름을 해석하기 위해 상용의 유동해석 프로그램인 Phoenix를 이용하였다. 이 프로그램에 아크의 방사에 의한 열전달을 고려하기 위해 아크 모델을 사용자 코딩을 이용하여 결합하였다. 또한 아크전류에 의해 발생한 자계와 전류가 유동에 미치는 영향을 포함시켰으며 유동의 난류특성을 Prandtl의 혼합거리모델을 이용하여 모의하였다. 본 논문에서 제안된 아크해석 기법은 시뮬레이션 결과와 비교가 여의치 않았으나 계산된 결과로부터 제안된 아크해석기법의 활용가 계승을 확인할 수 있었다. 향후 시뮬레이션 결과와의 비교를 실시할 예정이며 본 연구의 최종적인 목표인 SF6 가스차단기의 대전류 차단성능 평가에 적용 가능하도록 프로그램을 수정·보완해 나갈 것이다.

Key Words(중요용어) : SF6 가스차단기, 아크해석, 아크모델, 대전류 차단성능 평가

1. 아크해석 기술의 필요성

초고압 가스차단기의 차단설계기술은 설계된 차단부 형상에 대하여 차단성능을 평가하고 그 결과를 토대로 차단성능이 우수한 차단부 형상을 제시하는 것이라 할 수 있다. 이와 같이 우수한 차단부만을 선별하여 시험함으로써 차단 시험에 소요되는 기간과 비용을 획기적으로 감소시킬 수 있다.

차단성능은 소전류 차단성능과 대전류 차단성능으로 분류된다. 소전류 차단성능 평가에는 차단부에 대한 전계해석과 냉가스 유동해석 기술이 요구되며 저자들은 이미 높은 신뢰성이 입증된 소전류 차단성능 평가기술을 개발한 바 있다. 한편, 대전류 차단성능 평가기술의 경우는

아직 확보하지 못한 상태이다. 그 이유는 대전류 차단성능 평가에는 전계해석과 아크해석 기술이 요구되는데 이 가운데 아크해석 기술이 매우 어렵기 때문이다.

아크해석에 관한 세계적인 동향을 살펴보면 유한체적법[1], 유한요소법[2], FLIC법[3]을 기반으로 한 해석 기술로 분류할 수 있다. 각 방식에 아크모델을 결합하여 차단 전 과정에 걸쳐 차단부내의 가스온도, 압력, 밀도, 유속 등의 분포를 구하고 그 결과를 이용하여 과도회복전압의 상승률에 따른 Post-arc 전류를 계산하고 있다. 이로부터 극간질연회복특성 곡선을 확보하여 대전류 차단성능을 평가하고 있다.

본 논문에서는 대전류 차단성능 평가기술을 확보하기 위해 유한체적법에 바탕을 둔 상용의 유동해석 프로그램인 Phoenix를 이용하여 가스 차단부에 대한 열가스 유동해석을 시도하였다. 이 프로그램에 아크모델을 결합하여 방사에 의한 열전달을 고려하고 SF6가스의 특성을 데이터베이스화[4] 하였으며 Lorentz Force와 Joule 열에 의한 영향도 포함하고 있다. 또한 난류모

* 한국전기연구소
(경남 창원시 성주동 28-1, Fax: 0551-280-1589
E-mail : bylee@keri.re.kr)

델로 Prandtl의 혼합거리 모델을 적용하여 유동의 난류특성을 반영하였다.

2. 아크해석을 위한 유동장의 지배방정식

차단부내에서의 유동은 축방향으로의 흐름이 지배적이므로 원주방향의 유동 흐름을 무시하고 원통좌표계 (r, θ, z) 를 이용하여 아크해석을 위한 지배방정식을 표현하면 다음과 같이 된다.

. 연속방정식

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

. r 방향 운동량 보존 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r\rho v^2 - r\Gamma \frac{\partial v}{\partial r}] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} [\rho w v - \Gamma \frac{\partial v}{\partial z}] \\ & = - \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r\Gamma \frac{\partial v}{\partial r}] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} [\Gamma \frac{\partial w}{\partial r}] - \frac{2\mu v}{r^2} + (\vec{J} \times \vec{B})_r \end{aligned} \quad (2)$$

. z 방향 운동량 보존 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r\rho w v - r\Gamma \frac{\partial w}{\partial r}] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho w^2 \\ & - \Gamma \frac{\partial w}{\partial z}] = - \frac{\partial P}{\partial z} + (\vec{J} \times \vec{B})_z \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 $\Gamma = \mu + \mu_t$ 이고, \vec{J} 는 전류밀도벡터, \vec{B} 는 자속밀도를 나타내는 벡터량이다.

. 에너지 보존 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r\rho v h - r\Gamma \frac{\partial h}{\partial r}] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} [\rho w h - \Gamma \frac{\partial h}{\partial z}] \\ & = \frac{dP}{dt} + \sigma E^2 - q + \Phi \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 $\Gamma = (k + k_p)/c_p$, q 는 방사에 의한 에너지, σE^2 은 Ohmic Heating으로 σ 는 가스의 전기전도도, E 는 전계의 세기이다. 또한 Φ 는 층류와 난류 점성도에 의한 에너지 소산량으로 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(\mu + \mu_t) w \frac{\partial w}{\partial r}] \quad (5)$$

3. 아크방사모델과 노즐용삭 및 난류 모델

전류의 차단과정에서 발생한 아크의 방사에 의한 열전달을 그림 1과 같이 근사적으로 모의하였다. 이 모델에의하면 아크의 호심부 $(0 \leq r \leq R_1)$ 로부터 방사된 에너지의 일부가 흡수층 $(R_1 \leq r \leq R_2)$ 에서 흡수되고 나머지가 노즐에 도달하게 된다. 노즐에 도달한 방사에너지 가운데 일부는 노즐용삭에 기여하고 나머지는 손실되는 것으로 가정하였다. 이 모델에 따라 방사에너지를 구하는 과정을 요약하면 다음과 같다.

- ① 최대 온도 T_m 탐색
- ② 아크에너지 흡수층의 경계 R_1 과 R_2 탐색
- ③ 아크의 방사 반경 설정
- ④ 아크의 방사계수 q_e 를 계산하고 이를 적분하여 총 방사에너지를 계산[5]
- ⑤ 아크의 흡수계수 q_a 와 최대흡수계수 q_0 사이에 다음의 관계식이 성립한다고 가정

$$\frac{q_a(r)}{q_0} = A - \left(\frac{R_1 + R_2 - 2r}{R_2 - R_1} \right)^2 \quad (6)$$

단, A는 상수

- ⑥ q_0 를 결정하고, 식 (6)으로부터 q_a 를 계산

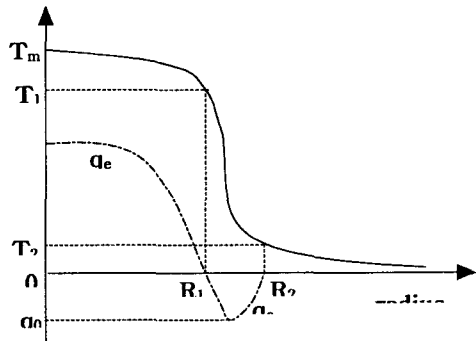


그림 1. 아크의 방사에너지 모델

난류모델로는 식(7)과 같은 Prandtl의 혼합거리모델을 사용하였다.

$$\mu_t = \rho (c_1 \delta)^2 \left| \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right| \quad (7)$$

여기에서, $\delta = \sqrt{\int_0^{R_{2k}} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{2k}}\right) 2r dr}$ 이다.

4. 전계 및 자계 계산

전류의 차단과정에서 가스를 통해 흐르는 전류에 의해 열이 발생한다. 이 열원은 Joule의 법칙에 따라 Ohmic Heating으로 표현되어 에너지 보존방정식 (4)에서 포함되어 있으며 따라서 전계분포를 구해내야 한다.

먼저 차단부내에서의 전류의 연속방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (8)$$

여기에서 전류밀도 \vec{J} 는 오옴의 법칙에 따라 도전매질내에서 $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ (는 전기전도도, \vec{E} 는 전계의 세기)의 관계가 성립한다. 전계의 세기는 스칼라 함수에 의해 $\vec{E} = -\nabla \phi$ 로 표현되므로 가스내에서의 전류분포를 나타내는 방정식은 다음과 같다.

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

경계조건으로는 양극과 음극부분에는 Dirichlet 조건을 그 외는 Neumann 조건을 설정한다. 위와 같이 전위분포를 구한 결과를 이용하여 전계분포를 계산할 수 있다.

또한 아크전류에 의해 발생한 자계는 아크 자체에 Lorentz Force를 작용시켜 유동의 흐름에 영향을 미치게 되는데 이것은 운동량보존식 (2) 및 (3)에 $(\vec{J} \times \vec{B})_r$ 와 $(\vec{J} \times \vec{B})_z$ 항으로 포함되어 있다. 아크 전류에 의해 유도된 자계는 아크의 축대칭 특성으로 인해 원주방향의 성분만을 갖게 된다. 따라서 아크의 투자율이 μ_0 로 일정하다고 가정하면 자계는 식(10)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$B = \frac{\mu_0 \int_0^r J_z 2\pi \xi d\xi}{2\pi r} \quad (10)$$

여기서 J_z 는 전류밀도의 축방향 성분이며 $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ 관계로부터 구하면 된다.

5. 72.5kV 20kA GCB의 아크해석 사례

위에서 기술한 열가스 유동해석기법을 72.5kV 20kA 하이브리드방식 가스차단부내에 대하여 대전류 차단과정에 발생한 아크해석에 적용하였다. 그림 2에는 차단부 내부구조를 도시하였다.

접점이 벌어지기 전까지는 냉가스 유동해석을 실시하여 아크해석을 위한 초기 조건을 구했으며 접점이 벌어진 이후는 위에서 기술한 아크해석 방법을 적용하여 가스 차단부내의 온도분포와 압력상승을 계산하였다. 그림 3에는 시간의 경과에 따른 차단부내 온도분포도를 보여주고 있다. 챔버의 초기 충전압력은 5 [bar]였으며 냉가스 유동해석 결과 열팽창실과 파퍼실린더 내부에서 약 0.5[bar]의 압력이 상승하였다. 이후 그림 4에 도시한 바와 같이 아크해석 결과 열팽창실에서는 약 4[bar], 파퍼실린더 내부에서는 약 5[bar]의 압력상승이 일어짐을 알 수 있었다.

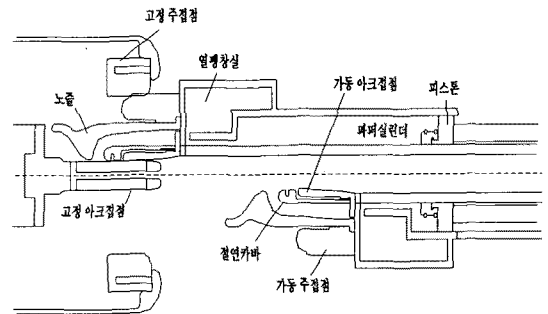


그림 2. 72.5kV 20kA 가스차단기 내부 구조도

6. 결 론

본 논문에서는 초고압 가스차단기의 대전류 차단성능 평가에 요구되는 열가스 유동해석 방법에 대하여 기술하였다. 그리고 제안된 방법을 하이브리드형 가스차단부내에 적용하여 전류영점 이전까지의 과정을 모의하였다. 계산된 결과를 시험결과와 비교하고자 하였으나 시험에 이용된 전류 파형으로부터 전류값을 정확히 알 수 없어 비교가 용이하지 않았다. 그러나 계산결과로부터 구한 압력상승치가 어느 정도 수용할 수 있는 범위 내에 있는 점으로 미루어 몇 가지 문제점을 보완하면 초고압 가스차단부내에서의 열가스 유동해석에 크게 활용이 가능할 것으로 기대된다. 향후 시험결과와의 정확한 비교를 시도할

것이며 또한 대전류 차단성능을 평가하기 위해서는 전류영점 이후, 과도회복전압 상승률에 따른 post-arc 전류의 계산이 필요하므로 이러한 점들을 고려하여 프로그램을 보완해 나갈 예정이다.

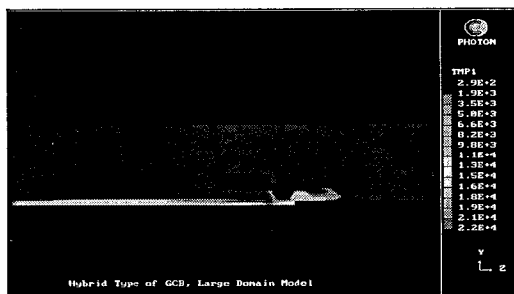
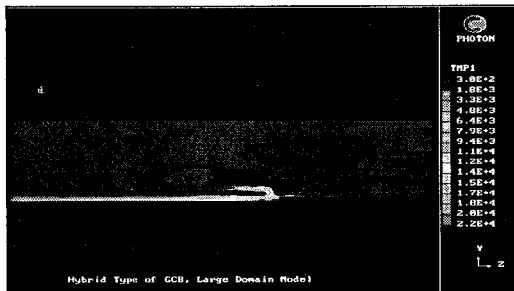
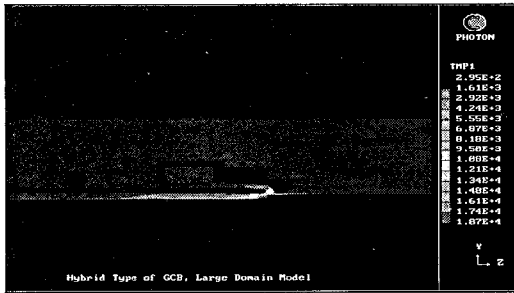


그림 3. 시간경과에 따른 차단부내 온도분포

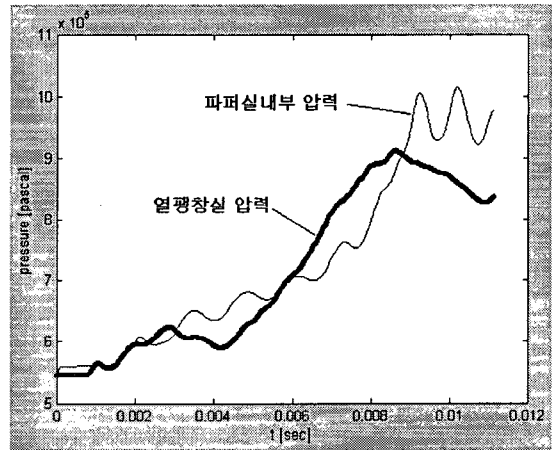


그림 4. 열가스 유동해석에 의해 구한 압력상승

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원 중기거점 과제인 “초고압 전력기기 기초 설계기술 개발”로 수행한 연구 결과입니다.

참고 문헌

- [1] J.D. Yan, M.T.C. Fang, W.Hall, "The Development of PC Based Tools for Auto-Expansion Circuit Breaker Design", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.14, No.1, January a999, pp.176-181
- [2] Mu Jingwei 외 3인, "FEM을 이용한 가스차단기의 아크해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, 1999, pp.345-348
- [3] R.A.Gentry 외 2인, "An Eunerian Differencing Method for Unsteady Compressible Flow Problems", Journal of Computational Physics 1, 1996, pp. 87-118
- [4] L.S. Frost 외 2인, "Composition and Transport Properties of SF6 and Their Use in aSimplified Enthalpy Flow Arc Model", Proceedings of The IEEE, Vol.59, No.4, April, 1971, pp.474-484
- [5] R.W. Liebermann, JJ. Lowke, "Radiation Emission Coefficients for Sulfur Hexafluoride Arc Plasmas", JQSRT,,16, pp.253-264