

하이브리드 아크모델을 이용한 초고압 가스차단기의 아크특성 해석

박경열, 송기동, 신영준, 장기찬, 송원표*, 권기영*
한국전기연구소, * 효성중공업(주) 기술연구소

Analysis of arc characteristics of EHV class GCB using hybrid arc model

K.Y.Park, K.D.Song, Y.J.Shin, K.C.Chang, W.P.Song*, K.Y.Kwon*
Korea Electrotechnology Research Institute, * HYOSUNG Industries Co.

Abstract - A mathematical model (hybrid arc model) for arc behaviour in an SF₆ puffer gas-blast circuit-breaker has been developed. It has adopted the advantages of integral method and differential method. The method has been applied to model puffer circuit breaker of Noeske et al [1] and good agreement of critical RRRV(Ratio of Rise of Recovery Voltage) has been obtained. Axial or radial distributions of temperature, electric field and arc radius are also presented and analyzed.

1. 서 론

초고압 SF₆ 가스차단기를 설계하는데 있어서, 대전류영역에서의 아크해석도 중요하지만 보다 중요한 것은 전류가 차단되는 시점을 전후한 영전류 영역에서의 아크해석과 전류차단후의 열적회복특성에 대한 해석이다. 현재까지 대전류영역의 해석은 주로 적분법이 사용되어 왔는데 [2], 이것은 1차원적으로 해석하기 때문에 계산기간이 긴 경우에 유리하고, 차단부내의 가동부를 모의하고, 아크접점 및 노즐 등의 용삭효과를 고려하는데 있어서 장점이 많았기 때문이었다. 그러나 이 적분법은 짧은 기간동안의 아크해석을 정도 높게 해석하는 데에는 한계가 있어 전류영점을 전후한 중요한 기간동안에는 2차원의 미분법을 사용하는 것이 보다 효과적인 것으로 알려져 왔으며 이 2가지의 아크해석 방법들은 각각 독립적으로 사용되어 왔다.

본 논문에서는 상기 2가지 아크해석 방법, 즉 적분법 및 미분법의 장점을 취하는 형태인 하이브리드 아크해석법을 제시하고 이 방법을 이용한 아크특성 해석 결과들 (온도분포, 전계분포, 아크반경 분포, 열적회복 성능 등)을 제시하고 분석한다.

하이브리드 아크해석법에서 대전류영역에 적용되는 적분법은 시작점부터 전류가 차단되는 마지막 전류영점전 전류크기가 약 500 - 1000A(이것을 전환전류라 한다)되는 시점까지 사용되고 그 이후

는 미분법을 사용한다. 이 전환전류로는 더 이상 전류를 크게 하더라도 해석결과에 그다지 영향을 미치지 않는 최소전류를 선택한다. 미분법에서 요구되는 외부유동에 대한 초기조건들(압력, 속도, 온도분포 등)은 이 전환전류 시점에서 적분법으로부터 계산된 값들을 사용한다.

2. 지배방정식 및 수치해석 방법

대전류영역에서 사용된 적분법에 대해서는 참고 문헌 [2]에 자세히 기술되어 있으므로 본 논문에서는 영전류영역에서 사용되는 미분법에 대해서만 설명하고자 한다. 국부 열평형상태를 가정하면 축방향대칭인 난류아크모델에 대한 지배방정식들은 다음과 같이 표시된다.

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

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial r} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r(\eta + \eta_T) \frac{\partial w}{\partial r}) \quad (1b)$$

$$\rho \frac{\partial h_o}{\partial t} + \rho u \frac{\partial h_o}{\partial r} + \rho w \frac{\partial h_o}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{(k + k_T)}{c_p} \frac{\partial h_o}{\partial r} \right) + \sigma E^2 - q \quad (1c)$$

$$I = \int_0^\infty dr 2\pi r \sigma E \quad (1d)$$

상기 지배방정식들에 사용된 문자들에 대한 설명을 표 1에 나타낸다.

표 1. 사용된 문자들의 물리적인 의미

r = 반경방향 좌표, z = 축방향좌표, u = 반경방향 속도

h_o = 총 엔탈피, w = 축방향 속도, ρ = 밀도

t = 시간, p = 압력, E = 전류

σ = 전기전도도, I = 전류, η = 점성계수

k = 열전도도, c_p = 정압비열, η_T = 난류점성도

k_T = 난류 열전도도, q = 단위 체적 및 시간당의 순방사 손실

난류점성도 η_T 및 난류 열전도도 k_T 는 Prandtl의 mixing length model을 사용하여 구할 수 있으며[3]. 단위 체적 및 시간당의 순방사 손실 q 는 Zhang 등이 제시한 방사모델[4]을 사용하였다. 그리고 온도 및 압력의 함수인 열역학 및 수송계수들은 Frost 및 Lieberman[5]의 논문에서 취하여 사용하였다.

상기 지배방정식들을 유한체적법을 사용하여 해석하였으며 반경방향의 온도경사의 변화가 큰 점을 고려하여 반경방향의 grid system은 non-uniform grid를 채용하였다. 한편 상기 지배방정식들을 풀기 위한 경계조건은 다음과 같다.

반경방향 :

$$u = \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \quad r \rightarrow 0 \quad (2)$$

$$h = h_\infty, \quad w = w_\infty, \quad r \rightarrow \infty \quad (3)$$

축방향 :

$$h_0 = h_{0e}(r, t), \quad w_0 = w_{0e}(r, t), \quad z = 0 \quad (4)$$

3. 결과 및 분석

해석은 실제 시험결과와의 비교가 가능한 G.E. 사의 모델 가스차단기[1]에 대해 적용하였으며 차단전류는 20.5kArms 및 25kArms 2가지를 선택하여 합성시험을 모의하여 계산하였다. 통전기간은 60Hz 0.5 싸이클이었으며 그림 1에 G-005 노즐의 형상과 차단부 내부의 아크형상을 나타낸다. 적분법에서 미분법으로의 전환은 전환전류 1000A에서 일어나며 전환전류 1000A에서부터 전류0점까지는 $-20A/\mu s$ 의 기울기를 가지고 감소한다.

3.1 전류0점전 아크거동

그림 2 - 5에 전류0점전 1000A, 513A, 189A, 97A 18A 및 0.06A에서의 축방향 온도(25kArms 시), 아크반경(25kArms 시), 축방향 전계(20.5kArms 시) 및 반경방향 온도(25kArms 시) 등의 분포를 나타낸다. 축방향 온도분포는 전류가 감소함에 따라 감소하며 특히 노즐목부분에서의 감소폭이 크며 전류0점에서의 아크전류의 차단은 노즐목에서 가장 먼저 일어남을 알 수 있다. 전류 0.06A에서의 축방향 온도분포는 강력한 축방향 대류효과에 의해 노즐목 시작부분(약 0.01m)부터 급격히 감소하여 노즐목이 끝나는 부분인 0.03m에서 최소가 된다. 그리고 노즐하류장에서의 온도가 상류장에 비해 상대적으로 낮은 것은 노즐하류장이 난류의 영향을 보다 크게 받기 때문으로 믿어진다. 또한 전계의 최대치는 노즐목 부분에서 발생

하며 전류0점에 가까워질수록 하류장쪽으로 조금씩 이동한다. 전계의 피이크치 부분의 모양은 노즐의 내부형상과 밀접한 관계가 있다. 주어진 전류치에 대해 전계는 식 (1d)에서 알 수 있는 바와 같이 아크의 전체 콘덕턴스에 반비례하므로 아크중심부의 온도와 아크반경과 밀접한 관계가 있다. 반경방향 온도분포(그림 5)는 전류가 1000A에서 0.06A로 감소함에 따라 약 26000K에서 약 8500K까지 감소하며 아크반경도 지속적으로 감소한다.

3.2 전류0점후 아크거동

그림 6에 차단전류가 25kArms인 경우의 영점 후 전류를 나타낸다. 이 경우 임계 RRRV는 약 $3.7kV/\mu s$ 이므로 실험치[1]와 잘 일치한다. 한편 차단전류가 20.5kArms인 경우 임계 RRRV는 약 $3.5kV/\mu s$ 가 얻어졌다. 실제시험 및 모의계산에서 합성시험을 실시하였으며 전류차단시의 di/dt 는 $-20A/\mu s$ 로 일정하게 유지하였다. 따라서 차단전류 25kArms 쪽이 20.5kArms에 비해 임계 RRRV값이 높은 것은 대전류기간 동안에 상승한 파퍼실의 압력이 더 높았기 때문으로 추정된다. 즉 전환전류 1000A에서 정체영역의 압력은 25kArms가 27.9bar, 20.5kArms의 경우 21.5bar였다.

4. 결 론

- 1) 파퍼형 가스차단기의 아크거동 및 차단성능 해석을 위해 적분법과 미분법의 장점을 취한 하이브리드법을 개발하여 모델차단기에 적용하여 실험결과와 비교하였다.
- 2) 전류0점 전후의 각각 다른 전류치에서의 축방향 및 반경방향 아크물성치를 계산하여 그 특성을 분석하였다.
- 3) 하이브리드법은 현존하는 아크해석법 중에서 가장 실제 차단기에의 적용 가능성이 높아서 파퍼형 가스차단기의 아크거동해석 및 설계변수 결정에 상당히 도움이 될 것으로 예상된다.

(참 고 문 헌)

- [1] H. O. Noeske, D. M. Benenson, G. Frind, K. Hirasawa, R. E. Kinisinger, H. T. Nagamatsu, R. E. Sheer, and Y. Yoshioka, "Application of arc-interruption fundamentals to nozzles for puffer interrupters," Report EL-3293, Electric Power Research Institute, California, USA, 1983.
- [2] 박경엽 외, "SF6 파퍼차단기의 수학적 모델링 I : 대전류영역", 대한전기학회 학계학술대회 논

문집(B), 640-644, 1993

- (3) M. T. C. Fang, Q. Zhuang, and X. J. Guo, "Current-zero behaviour of an SF₆ gas-blast arc. 2. Turbulent flow," *J. Phys. D*, vol. 27, p. 74, 1994.
- (4) J. F. Zhang, M. T. C. Fang, and D. B. Newland, "Theoretical investigation of a 2 kA DC nitrogen arc in a supersonic nozzle," *J. Phys. D*, vol. 20, no. 3, p. 368, 1987.
- (5) L. S. Frost and R. W. Liebermann, "Properties of SF₆ and their use in a simplified enthalpy flow model," *Proc. IEEE*, vol. 59, pp. 474--485, 1971.

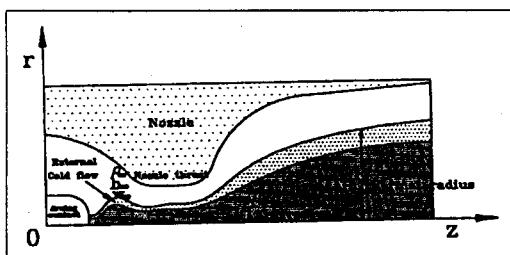


그림 1 G-005 노즐 및 차단부 내부의 아크형상

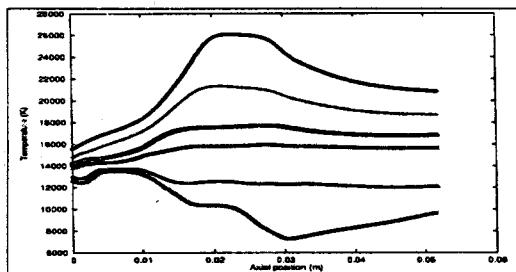


그림 2 전류0점전 축방향 온도분포(정체압력 27.9bar, 차단전류 25kArms). 각 곡선은 위에서부터 순시전류치 1000A, 513A, 189A, 97A, 18A 및 0.06A에 해당됨.

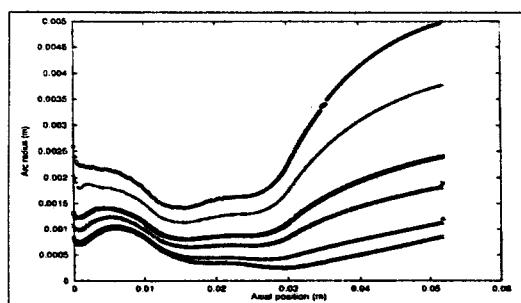


그림 3 전류크기에 따른 아크반경 (조건 및 전류 크기는 그림 2와 동일함)

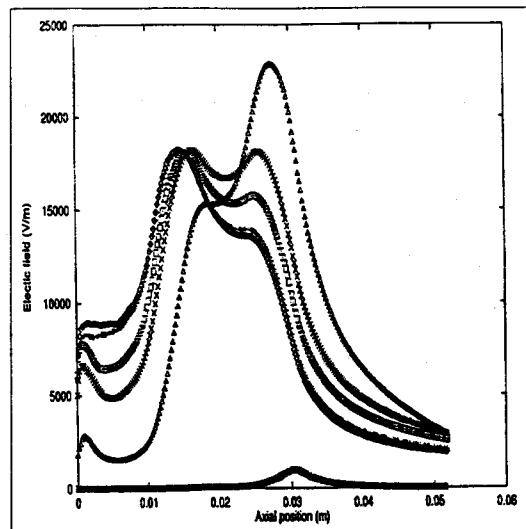


그림 4 축방향 전계분포(정체압력 21.5bar, 차단전류 20.5kArms, 각 곡선은 순시전류치 1000A(다이아몬드), 513A(더하기), 189A(사각형), 97A(곱표), 18A(삼각형) 및 0.06A(곱표-사각형)에 해당됨)

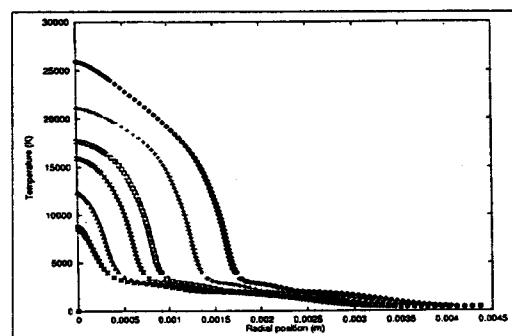


그림 5 전류0점전 반경방향 온도분포($z=2.6\text{cm}$, 조건 및 전류크기는 그림 2와 동일함)

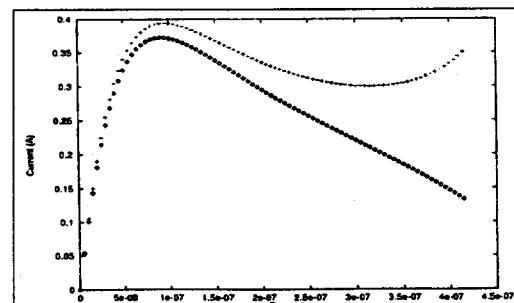


그림 6 영점후 전류 (차단전류 25kArms, $\text{RRRV}=3.6\text{kV}/\mu\text{s}$ (다이아몬드), $\text{RRRV}=3.8\text{kV}/\mu\text{s}$ (더하기))