

대전류 영역에서의 가스차단기 내의 아크의 자발적인 흐름현상에 따른 에너지 전달의 수치적 해석

최 재원, 최 승길, 강 형부
한양대학교 전기공학과

The Study on the Self-Flow Generation Phenomena in a Gas Circuit Breaker

Jae-Won Choi, Seung-Kil Choi, Hyung-Boo Kang
Dept. of Electrical Eng. Hanyang Univ.

Abstract

This study presents the energy transfer of thermal arc in the circuit breaker with self-generation flow without puffer action. The phenomenon of pressure increase in the cylinder which encloses fixed contact was focused on and rising current stage was considered. Temperature and velocity of arc plasma were calculated by using energy balance equation and the amount of energy transfer due to convective flow was calculated.

1. 서 론

차단용량의 증가와 더불어 SF₆차단기의 개발은 수십년 전부터 활발하게 진행중이다. 파퍼(puffer) 작용이 없는 SGFCB(Circuit breaker with self-generation flow)는 기계적인 힘을 이용하여 아크를 소호하는 방식이 아니라, 고장전류 차단시 발생하는 아크의 에너지를 이용하여 아크를 소호하는 차단기이다. 즉 고장전류 차단시 두 접점에서 발생하는 아크 에너지로 실린더(cylinder)의 가스를 가열시켜 압력을 상승시키고, 그 가스압력으로 아크를 소호하는 메커니즘을 이용한다. 대전류 영역에서는 파퍼작용에 의한 압력상승보다 아크 자체에 의한 영향이 크다[1]. 따라서, 이러한 차단기는 기계적인 입력이 작고, 소형·경량화가 가능하다.

SGFCB의 아크 소호 과정은 대전류 영역에서의 전기적인 아크에서 가스로의 에너지 전달 단계, 전류가 영점으로 갈 때의 아크 소멸 단계, 후 아크(post-arc)단계의 세 단계로 나누어 볼 수 있다.

2. 에너지 전달의 모델링

대전류 영역에서의 압력변화를 계산하기 위해서는 아크에서 실린더 가스로 전달되는 에너지를 알

아야 한다. 따라서 아크 플라즈마의 모델링 작업이 선행되어야 한다. 아크 칼럼의 거동은 몇 가지 비선형 보존식이 복잡하게 결합된 형태로 나타내어진다.

실린더로의 질량 흐름을 및 아크에 의한 방사량에서 실린더 가스에 흡수된 양을 구하기는 쉽지 않다. 따라서 실린더 가스로의 정량적인 해석을 하는데 주안점을 두었다.

2.1 아크 플라즈마 모델링

전류가 상승하는 동안에 플라즈마 파라미터(온도, 속도)는 시정수를 가지고 변한다. 파라미터는 물리적 현상(전리, 재결합 등)에 의해 결정되는데, 이의 시정수는 물리적 현상의 특성 시간 보다 더 오래 지속된다. 따라서 이 영역에서 아크 플라즈마의 변화는 준 정적 상태(quasi-stationary state)가 계속된다고 보고, 아크칼럼은 원통형-축대칭이라고 가정하였다. 아크에서 실린더내 가스로의 에너지전달을 두 단계로 나누어 해석한다.

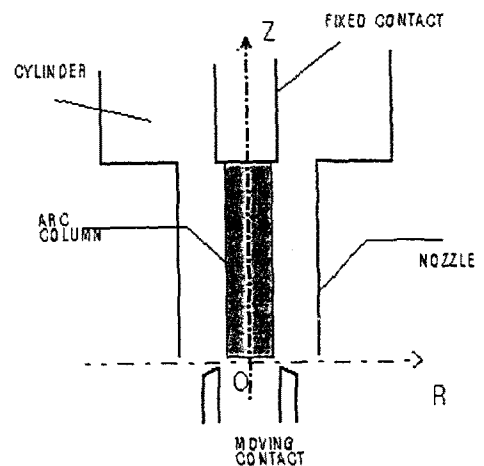


그림 1. 모델링 영역

그림 1은 모델링 영역을 나타내었다.

첫째, 아크 플라즈마의 온도(T)와 축방향 속도 (v_z)를 계산한다.

둘째, 실린더 입구에서 계산된 온도와 속도로 부터 에너지 전달을 구한다.

2.2.1 수치해석 I

계산과정은 다음과 같다.

- 1) 전류변화(I(t))와 질량흐름율(D)을 결정한다 [2].
- 2) 시간 $t_i \sim t_i + \Delta t$ 동안의 아크전류 $I(t_i + \Delta t/2)$ 와 길이, 압력 $P(t_i)$ 은 일정하다고 가정한다. 에너지 보존식에 의해 모델링 영역에서 온도와 축방향 속도를 구한다.
- 3) 아크에서 실린더로의 방사와 대류에 의한 엔탈피 플럭스(enthalpy flux)를 계산한다.
- 4) 실린더 가스의 비열을 사용하여 시간 간격을 고려한 온도 증가분(ΔT)과 압력 증가분(ΔP)을 계산한다. 이 값을 ($t_i + \Delta t$)일 때의 압력값으로 사용한다.
- 5) 시간이 증가함에 따라 2)~4)과정을 반복 계산한다.

2.2.2 수치해석 II

등온 플라즈마로 가정하고, 방사방향(r) 대류와 축방향 전도를 무시하면 [3] 정적상태 에너지 보존식(stationary state energy balance)은 다음과 같다.

$$\rho c_p v_z \frac{\partial T}{\partial r} = \sigma E^2 - U + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) \quad (1)$$

여기서, ρ 는 질량밀도(mass density), c_p 는 정압 비열, σ 는 전기전도도, λ 는 열전도도, U는 플라즈마에 의한 방사에너지, E는 전기장이다.

속도 v_z 를 계산하기 위해서 마하수(mach number; M)는 방사방향에 대해서는 일정하다고 가정한다[4]. 임의의 축방향(z)에 있어서 질량흐름율(D)은 다음과 같다.

$$D = 2\pi \int_0^R r \rho v_z dr = 2\pi M \int_0^R r \rho C dr \quad (2)$$

여기서, C는 음속(sound velocity)이다. 질량흐름율(D), $\rho(r)$, C(r)로부터 마하수를 구할 수 있고, 속도 v_z 는 다음과 같다.

$$v_z(r, z) = M(z) C(r, z) \quad (3)$$

전기장의 계산은 옴(ohm)법칙을 이용하여 전류변화로부터 계산할 수 있다.

$$I = 2\pi E \int_0^R r \sigma dr \quad (4)$$

위 식의 파라미터들(질량밀도, 전기전도도, 열전도도 등)은 온도와 압력의 함수로 가정한다[5].

식 (1)은 엇갈린 격자(grid)를 사용한 유한차분법을 이용하여 계산하고, 식 (1)~(4)를 수렴할 때

까지 반복 계산한다.

위의 계산 결과를 이용하여 에너지 전달을 구한다. 엔탈피 플럭스는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta E_c = 2\pi \int_0^R r \rho h v_z dr \cdot \Delta t \quad (5)$$

여기서, h는 비엔탈피(specific enthalpy)이며, 방사에 의한 에너지 전달량은 무시한다. 실린더 안의 SF₆를 이상기체로 가정하면 압력증가분을 다음과 같이 구했다.

$$\Delta P = \frac{\Delta E_c}{C_v \cdot M_g} \frac{P_0}{T_0} \quad (6)$$

여기서, $C_v = 0.7$ (g⁻¹K⁻¹), $M_g = 9$ (g) 이다.

3. 검토 및 결과

그림 2는 2ms일 때 노즐입구로부터 반경방향에 대한 온도의 변화를 나타낸다.

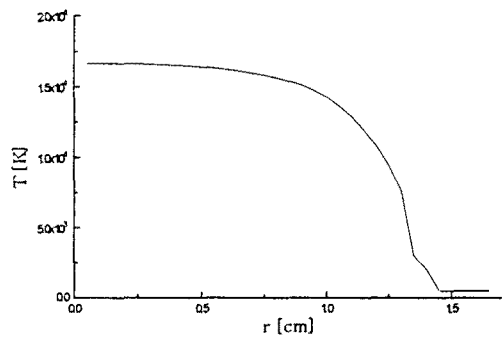


그림 2. 반경방향에 따른 온도변화.
I = 9300 (A)

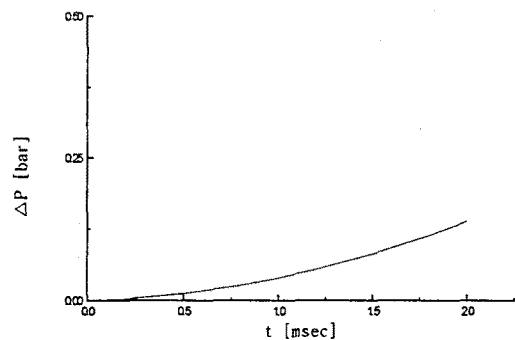


그림 3. 시간에 따른 압력증가

그림 3은 2(msec)까지 계산한 실린더 가스의 압력증가를 나타낸다. 이 결과는 실험값[2]과 비교적 큰 차이가 있다. 이는 계산 과정에서 일정한 질량흐름율을 가정하여 계산 했는데 초기단계에는 충분한 질량흐름이 발생되기 어렵기 때문이다.

이동 전극이 노즐을 벗어나는 시간까지 압력의 변화를 계산하면, 전류 영점부근에서 아크를 소호시킬만한 압력의 증가를 예측할 수 있으므로, 차단 전류에 따른 압력의 증가와 더불어 차단가능한 전류영역을 추측할 수 있다[6].

본 연구에서 채택한 수치방법은 아크 플라즈마의 특성이 질량흐름율의 변화에 상당히 민감하게 나타나므로, 전체적인 계산과정에 질량흐름율을 사용하지 않는 접근방법이 필요하다고 사료되다.

(참 고 문 헌)

- [1] T.Ushio, "Self Interruption By A Gas Circuit Breaker Without Puffer Action", IEEE PAS, Vol.100, No.8, pp.3801-3810, 1981
- [2] A.Gleizes, "Study of Circuit-Breaker Arc with Self-Generated Flow : Part I", IEEE Trans. Plasma Science, Vol.16, No.6, pp.606-614, 1988
- [3] W Hermann, "Investigation of a cylindrical, axially blown, high-pressure arc", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.7, pp.607-619, 1974
- [4] J.J.Lowke and H.C.Ludwig, "A simple model for high-current arcs stabilized by forced convection", J. Appl. Phys., Vol.46, No.8, pp.3352-3360, 1975
- [5] W.Liebermann, "Composition and Transport properties of SF₆ and Their Use in a Simplified Enthalpy Flow Arc Model", Proc. IEEE, Vol.59, No.4, pp.474-485, 1971
- [6] Y.Murai, "An Improvement Of Low Currenting Capability In Self-interruption Gcb", IEEE PAS, Vol.101, No.2, pp.448-453, 1982