

간단한 엔지니어링기법에 의한 이중유동형 노즐내의 저전류 정적 아크의 특성 비교

송 기동, 신 영준, 박 경엽
(한국전기연구소)

Comparison of Characteristics of Steady State Low Current Arcs In Dual Flow
Nozzles by Simplified Engineering Techniques

K.D. Song, Y.J. Shin, K.Y. Park
(Korea Electrotechnology Research Institute)

ABSTRACT

The arc characteristics have influences on the current interruption phenomena in the regimes of low current as well as high current. It is very important to understand the arc characteristics for the initial design of a circuit breaker.

This article describes the theoretical analysis of the arc characteristics by means of arc energy integral method when convection dominated low current arcs are produced in the dual-nozzle air and SF₆ gas flows of a model interrupter. The arc radius, average electric field strength and arc voltage have been investigated at the current range of 60 to 230 A and at the upstream pressure of 0.6 MPa in both air and SF₆ gas. The results have been compared to show the difference of both gases and the trends similar to those of other investigations.

1. 서론

차단기의 소호원리를 이해하기 위해서는, 차단기의 양 접점 사이에 발생한 아크의 기본적인 특성을 이해하는 것이 중요한 요소중의 하나이며, 대전류 영역 뿐만 아니라 저전류 영역에서도 아크의 물리적 성질이 차단현상에 미치는 영향은 매우 크다.

공기속에서의 저전류 정적 아크의 특성을 이론적으로 이해하기 위해서, 아크에너지 적분법을 적용이 일정한 단일유동형 노즐[1]과, 반각이 15°인 원추모양의 단일유동형 노즐[2], 반각이 8°인 원추모양의 단일유동형 노즐[3], 오리피스(Orifice)모양의 단일유동형 노즐[4], 원추모양의 이중유동형 노즐[5] 내에 발생한 아크에 적용한 예가 있다.

그러나 이러한 적용에서는, 노즐하류장에서 종종 발생하는 유동분리에 의한 일반적 유체충격파(Shock wave)와, 하류장에 위치한 접점의 앞부분에 종종 발생하는 활모양의 유체충격파와, 오리피스모양의 노즐하류장에 발생하는 병모양의 유체충격파의 영향을 고려하지 않았다. 냉가스 유동질량에 대한 실험결과를 활용하고, 이중유동형 노즐내에 발생한 유체충격파도 고려하여 공기속에서의 저전류 정적 아크특성을 해석한 예[6]도 있다.

본 논문에서는, 그림 1과 같은 이중압력방식의 유동시스템을 채택한 실험장치를 이용하여 이중유동형 노즐내에서의 냉가스 유동질량을 실험적으로 구하고, 이때 노즐내에 발생한 유체충격파의 영향도 고려하여, 공기와 SF₆가스속에서 두 접점 사이에 형성된 아크에 참고문헌 [6]에서 언급한 아크에너지 적분법을 적용하였다.

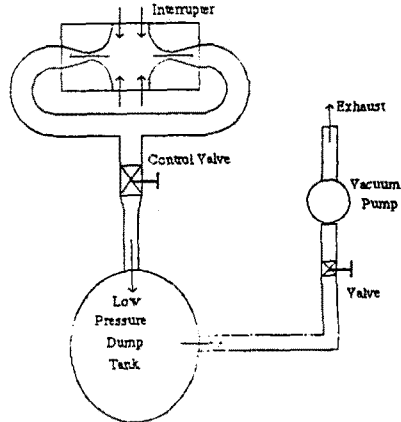
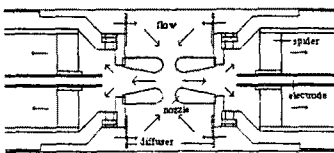


그림 1. 이중압력 유동시스템.

먼저, 아크를 2개의 영역, 즉 노즐축상의 노즐간의 중앙부에 위치한 정체영역(stagnation point)과 그외의 유동영역으로 나누고, 각각의 영역에 있는 아크의 미분요소의 체적에 축방향 냉가스 유동질량함수, 질량보존 방정식, 에너지보존 방정식, 오음의 법칙을 적용하여 아크반경, 전계분포, 아크전압과 같은 아크특성을 조사하여 상호 비교하였다.

2. 아크에너지 적분법

2.1. 가정 및 간략화

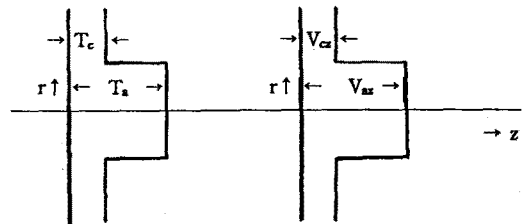


그림 2. 2영역 모델

아크주 내부 및 주위가스의 온도 및 축방향 속도는 거의 일정한 것으로 실험적 및 이론적으로 보여져 왔기때문에, 그림 2와 같이 2영역 모델로 간략화할 수 있으며, 다음과 같은 합리적인 가정을 하여 아크에너지 적분법을 적용하였다.

- (1) LTE(Local Thermodynamic Equilibrium)가 성립된다.
- (2) 유동은 무난류로 축대칭이며, 아크는 원뿔모양이다.
- (3) 반경방향의 압력경도는 무시할 만큼 작다.
- (4) 축방향 및 반경방향의 열전도는 열대류에 비교해 무시할 만큼 작다.

2.2 냉가스 유동

냉가스의 유동성질을 알기 위해, 2종류의 노즐간격에 대해 노즐내면과 노즐축상을 따라 정적인 압력을 측정하였다. 이 측정압력치와 고압정체압력치를 알면, 등엔트로피(isentropic) 관계식 [6]을 사용해 노즐축상의 마하수(Mach No.), 밀도, 온도, 유속, 축방향 속도를 계산할 수 있다. 측정한 정적인 압력치와 계산한 마하수의 분포는 그림 3과 같다.

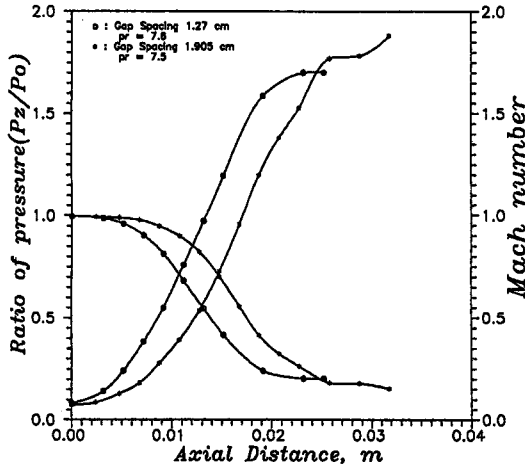


그림 3. 압력 및 마하수 분포

노즐을 통해 흐르는 냉가스 유동은 노즐단면적에 걸쳐 균일하고, 비점성이며, 칼로리적으로 완전하다고 가정했다. 노즐압력비가 7.5이고 노즐간격이 1.905 cm일 때와 노즐압력비가 7.6이고 노즐간격이 1.27 cm일 때 이중유동형 노즐내의 축방향 거리의 함수로 냉가스 유동질량함수, $\rho_a V_{ax}$ 를 구하면, 공기의 경우는 그림 4와 같고 SF6가스의 경우는 그림 5와 같이 된다. 이 냉가스 유동질량함수를 살펴보면, 노즐하류장에 유동분리에 의한 유체충격파의 영향을 알 수 있으며, 이 함수를 선형함수의 조합으로 구성할 수 있다.

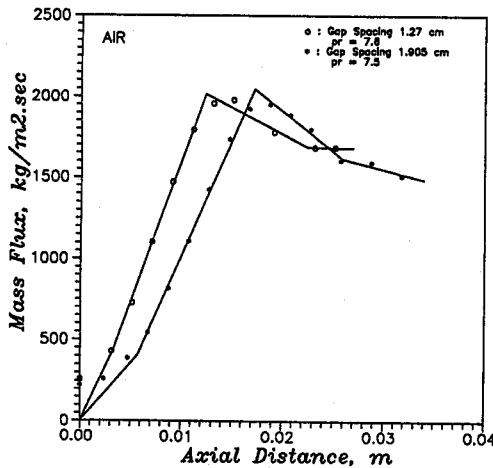


그림 4. 공기에서의 냉가스 유동질량함수

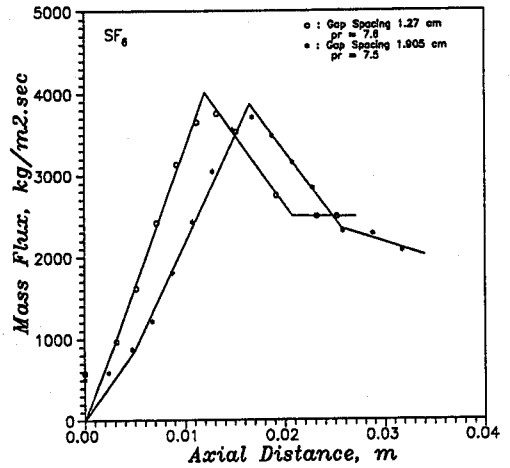


그림 5. SF6에서의 냉가스 유동질량함수

2.3 아르플라즈마 유동

아크내의 플라즈마 유동은 오염열때문에 단일적이 아니며, 내부온도는 대략 20,000 °K 정도로 일정하다고 볼 수 있다. 또한 자기적 핀치압력이 무시할 수 있을 정도로 작고, 아크반경이 노즐목경에 비해 아주 작기때문에, 아르플라즈마내의 정적인 압력은 냉가스 유동의 정적인 압력과 같다고 가정할 수 있다.

비점성이며 압축성 아르플라즈마 유동에 대해 모멘트방정식과 상태방정식을 적용하면 아르플라즈마의 유동질량함수를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_a V_{ax} = P_a \left[2 - \frac{\ln \left(\frac{P_a}{P_0} \right)}{R T_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서 아래첨자 a는 아르플라즈마를 의미하며, ρ 는 밀도, V_a 는 축방향 속도, P는 압력, P_0 는 고압정체압력, R은 가스상수, T 는 온도를 각각 나타낸다.

3. 아크특성 해석

3.1 정제영역의 해석

이 영역에 있는 미분요소의 체적에 질량보존 방정식과 에너지보존 방정식을 적용하고, 오음의 법칙과 냉가스 유동질량함수를 결합시켜 연속방정식을 풀면 아크반경과 전계분포에 대한 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r_{a1} = \left(\frac{I^2}{a_1 \pi^2 K_1} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

$$K_1 = \sigma (h_a - h_c) \quad (3)$$

$$E_1 = \left(\frac{a_1 K_1}{\sigma^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

여기서 아래첨자 1, a, c는 각각 정제영역, 아르플라즈마, 냉가스 유동을 나타내고, r_0 는 아크반경, I는 전류, a_1 은 냉가스 유동질량함수의 기울기를 의미하는 정수, h는 엔탈피, σ 는 도전율을 나타낸다.

3.2 유동영역의 해석

이 영역에도 상기와 마찬가지로 미분요소의 체적에 질량보존 방정식과 에너지보존 방정식을 적용하고, 오음의 법칙과 냉가스 유동질량함수를 결합시켜 풀면 아크반경과 전계분포에 대한 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r_{a2} = \left[\frac{4 I^2}{\pi^2 K} \left(\frac{1}{a_n} \ln(a_n z + b_n) + \phi_n \right) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

위 식에서 K는 다음과 같이 주어지고,

$$K = \sigma [2(h_a - h_c) + (V_{av}^2 - V_{ca}^2)]$$

$$E_n = \left[\frac{K a_n}{4 \sigma^2 [\ln(a_n z + b_n) + \phi_n a_n]} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

전계분포에서 ϕ_n 는 적분상수로 다음과 같이 구해진다.

$$\phi_2 = \frac{K}{4 K_1 a_1} - \frac{1}{a_2} \ln(a_2 z_2 + b_2)$$

$$\phi_n = \frac{1}{a_{n-1}} \ln(a_{n-1} z_n + b_{n-1}) + \phi_{n-1} - \frac{1}{a_n} \ln(a_n z_n + b_n)$$

여기서 아래첨자 n는 2, 3, 4로 냉가스 유동질량함수의 기울기가 변하는 지점을 나타내며, a와 b는 이 함수의 기울기와 절편을 각각 나타낸다.

또한 전계를 축방향으로 적분하면 다음의 관계식에서 아크전압을 구할 수 있다.[6]

$$V_{arc} = 2 \left[\int_{z_1}^{z_2} E_1(z) dz + \int_{z_2}^{z_3} E_2(z) dz + \int_{z_3}^{z_4} E_3(z) dz + \int_{z_4}^{z_5} E_4(z) dz \right] \quad (8)$$

4. 해석 결과

본 연구에서는 전류범위 60 A부터 230 A까지 변화시켜 가면서, 고압정체압력 0.6 MPa(6 atm)의 공기 및 SF₆가스속에서, 이종유동형 노즐내에 형성된 정적인 아크의 아크반경, 전계분포, 아크전압을 계산하고 상호 비교하였다.

그림 6 및 그림 7은 노즐간격이 1.27 cm 및 1.905 cm인 경우, 공기속에서 형성된 아크의 반경을 축방향의 거리의 함수로 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 노즐간격이 증가하면 아크반경은 조금 증가하고, 전류가 커지면 아크반경도 더불어 증가한다. 아크반경은 노즐간격과는 무관하게 노즐목에서 가장 작고, 노즐하류장으로 갈수록 점차 증가하지만, 유체충격파가 발생하는 부분 근처에서 갑자기 작아지는 경향을 보이고 있다. 이는 유체충격파로 인한 영향으로 판단되며, 아크를 가시화시켜 관찰한 예[7]를 보면 이 부분에서 아크의 조도가 작아져 희미하게 보이고 아크반경이 줄어드는 것을 알 수 있다. 정체영역에 가까 곳에서는 반경방향 및 축방향의 속도가 거의 영으로 되기때문에 아크반경이 매우 커지는 현상이 자연적으로 나타나 보인다.

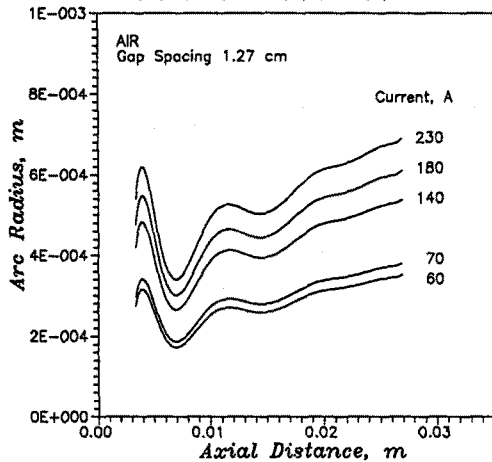


그림 6. 공기속에서의 아크반경(노즐간격 1.27 cm)

SF₆가스속에서 형성된 아크의 반경을 노즐간격 1.27 cm 및 1.905 cm의 경우에 축방향의 거리의 함수로 나타내보면 그림 8 및 그림 9와 같다. 아크반경의 변화는 공기의 경우와 아주 유사하고, 크기도 거의 같다. 그러나 일반적으로 아크주만을 고려하면 SF₆의 경우가 공기의 경우보다 반경이 훨씬 작지만 아크맨탈을 고려하면 반경은 거의 같게 된다.

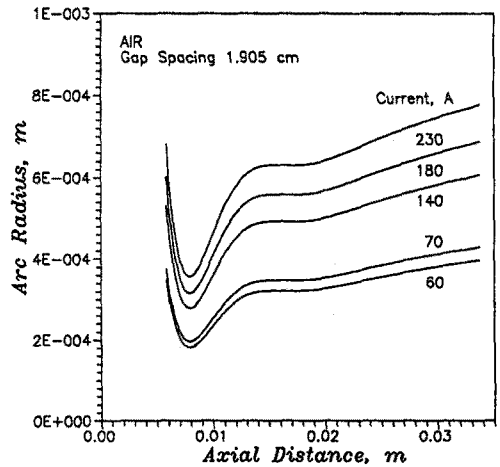


그림 7. 공기속에서의 아크반경(노즐간격 1.905 cm)

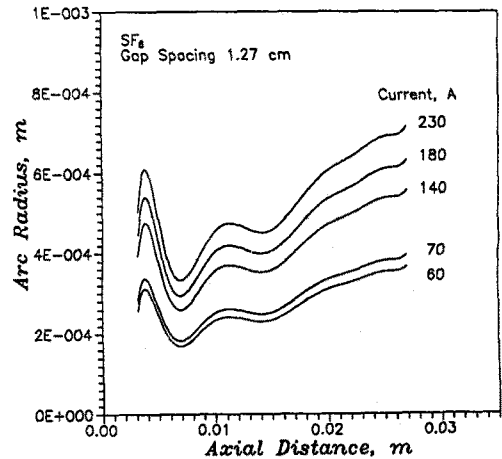


그림 8. SF₆속에서의 아크반경(노즐간격 1.27 cm)

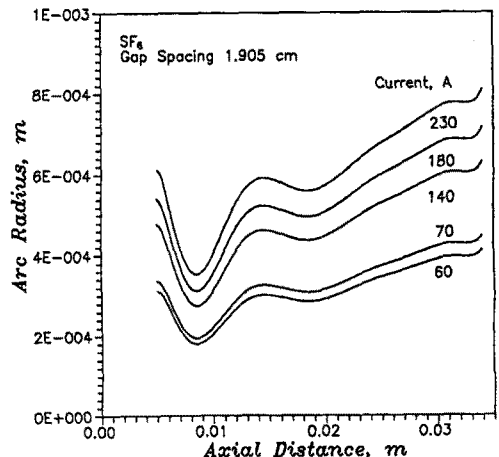


그림 9. SF₆속에서의 아크반경(노즐간격 1.905 cm)

그림 10에는 공기 및 SF₆가스속에서 노즐간격 1.27 및 1.905 cm의 경우의 축방향에 있어서의 전계분포를 비교하고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 전계는 정제영역 근처에서 가장 높으며, 노즐내에서는 노즐목 부분에서 가장 높은 것을 알 수 있다. 따라서 노즐목 부분에서 아크는 가장 수축되고, 노즐하류장중 노즐목 근처에서 소호가 제일 먼저 시작될 것으로 추측할 수 있으며, 영전류후 고온가스가 정제되어 재점화 또는 재발호를 야기할 수 있는 영역으로는 정제영역 근처라는 것도 추론할 수 있다. 전계의 세기는 SF₆의 쪽이 공기의 경우보다 다소 높고, 유체충격파가 일어나는 위치에서 전계의 변화가 심한 것을 관찰할 수 있다.

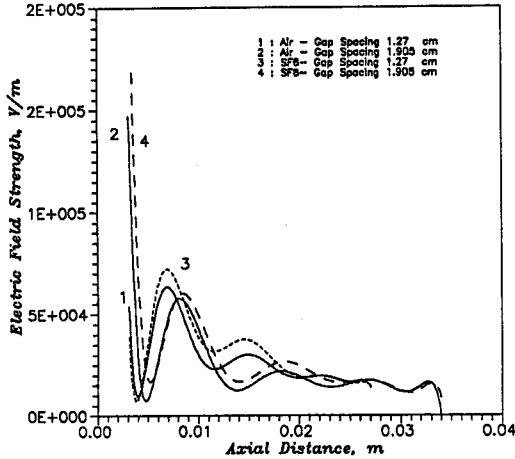


그림 10. 축방향 전계분포

전계의 세기를 축방향 거리에 따라 적분하여 구한 아크 전압이 그림 11에 나타나 있다. 공기의 경우, 노즐하류장의 유체충격파가 발생하는 지점까지는 노즐간격이 짧은 쪽의 아크전압이 보다 높고, 이후 노즐출구까지는 노즐간격이 긴 쪽의 아크전압이 보다 높게 나타난다. SF₆가스의 경우, 노즐축상의 모든 위치에서 노즐간격이 짧은 쪽이 아크전압은 보다 높다. 그 이유는 공기속에서의 유체충격파의 영향이 보다 강하다는 것을 의미한다. 또한 공기속에서는 노즐간격이 1.27 cm일 때와 SF₆속에서는 노즐간격이 1.905 cm일 때, 유체충격파가 발생하는 지점부터 노즐출구까지 아크전압이 오히려 감소하는 현상이 발생하는데, 이는 일반적으로 강한 유체충격파가 발생하면 압력, 밀도, 온도가 증가하고 유동속도는 떨어지며 유동은 저음속으로 되기때문에 이 부분에서 국부적으로 아크전압이 떨어지게 된다.

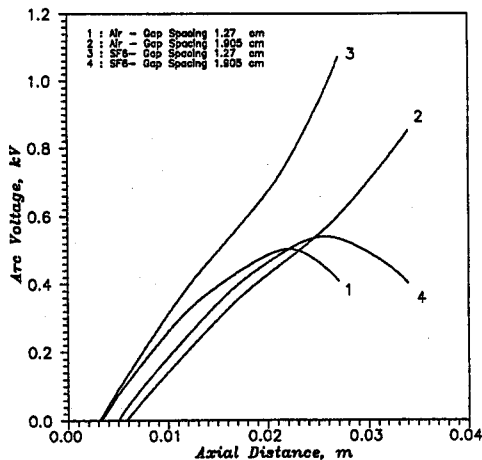


그림 11. 아크전압의 변동

5. 결론

본 연구에서는 전류범위 60 A부터 230 A까지 변화시켜 가면서, 고압정제압력 0.6 MPa(6 atm)의 공기 및 SF₆가스속에서, 이중유동형 노즐내에 형성된 정적인 아크의 아크반경, 전계분포, 아크전압을 계산하고 상호 비교하였으며, 이 결과들은 이전의 연구결과[6, 8, 9]와 유사한 경향을 나타내었다.

따라서 해석적 방법인 간단한 엔지니어링기법을 이용하여 노즐내에 형성된 저전류 정적 아크의 특성을 파악할 수 있었으며, 또한 이 방법은 개략적인 노즐의 설계에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. H.T. Nagamatsu, "Experimental and theoretical study of a d.c. arc in a constant diameter nozzle flow," IEEE Paper No. 81 SM468-8, July 1981.
2. H.T. Nagamatsu and P.G. Scavallo, "An experimental and theoretical study of a d.c. arc in a 30° conical nozzle flow," AIAA 18th Aerospace Sciences Meeting, Paper No. AIAA-80-0092, 1981.
3. H.T. Nagamatsu and P.D. Symolon, "Experimental and theoretical study of a d.c. arc in a 8° conical nozzle flow," AIAA 19th Aerospace Sciences Meeting, Paper No. AIAA-81-0097, 1981.
4. H.C. Whang and H.T. Nagamatsu, "Experimental and theoretical study of a direct-current arc in an orifice nozzle flow," AIAA Journal, Vol. 23, No. 7, July 1985.
5. I. Serbetci, "Determination of the nature of steady and ramped convection stabilized air arcs near current zero," Ph.D. Thesis, RPI, 1989.
6. I.D. Song, Y.J. Shin, H.S. Lee and K.S. Kim, "Theoretical analysis of steady state low current arcs in dual flow nozzles," 대한전기학회, 1992년 학계학술대회 논문집(B), 7월 1992년, PP 952-957.
7. D.M. Benenson, G. Frind, R.E. Kinsinger, H.T. Nagamatsu, H.O. Noeske and R.E. Sheer Jr., "Fundamental investigation of arc interruption in gas flows," EPRI EL-1455, Project 246-2, Final Report, July 1980.
8. Y.J. Shin and H.T. Nagamatsu, "Theoretical and experimental results for low current d.c. steady state arc in a dual-nozzle air flow," AIAA 31st Aerospace Sciences Meeting, Paper No. AIAA-93-0818, Jan. 1993.
9. I. Serbetci and H.T. Nagamatsu, "Nature of convection stabilized dc arcs in dual-flow nozzle geometry. Part I: The cold flow field and dc arc characteristics," IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 18, No. 1, Feb. 1990, pp 91-101.