창 립
40주년학술대회
논문87-H-20-4

SF_6 gas가 초고압 차단기 내에서 Arc Plasma 에 미치는 영향

최 경철° 서울대학교 공과대학원
황 기웅 전기 공학과

Influence of SF_6 Gas On An Arc Plasma In UHV Circuit Breaker.

Kyung Chuel, Choi° Seoul National University
Ki Woong, Whang Electrical Engineering Dept.

Abstract

Computational and theoritical investigations of an arc plasma have been made for the design of a circuit breaker. Modeling of an arc plasma used to be very involved and difficult because of the many variables and factors. In this paper, the dynamic behavior of an arc plasma is investigated by solving the MHD equations. Comparing an SF_6-blast arc with a non-blast arc, it has been found that the effect of gas-blast has a great influence on density rather than temperature.

I. 서론

현재까지 발표된 SF_6 아크의 이론 논문을 살펴보면 1971년 Swanson 과 Roidt 에 의한 boundary layer기술을 이용한 해석[5], 1975년 Lowke 와 Ludwig 의 1차원 해석문제[6], 1980년 Richley와 Tuma 에 의한 해석 [7] 등이있다. 주로 1980년 이전까지는 정상상태의 아크 해석 문제를 다루었다. 1980년 이후에 들어 비로소 시간에 따라 변화하는 아크 문제를 다루기 시작했는데, 1980년 D.T. Tuma[8] 1982년 Ragaller[9] , 1986년, Mitchell [10] IKEDA [12] , Fang[11] 등이 blast 아크의 동적운동을 다루었다.

본 논문은 위 논문들을 보완하여, 아크 plasma 를 지배하는 식으로 full Resistive MHD식을 사용하였다. 이식은 Mass Conservation, Momentum, Energy 식과 Maxwell 식으로 이루어진다. 중성 SF_6 가스를 지배하는 식으로, 유체의 Mass Conservation, Momentum, Energy식 이 사용되었다. 이식들은 FDM(Finite Difference Method)의 ADI (Alternating Direct Implicit)방법으로 풀어졌으며, 이와 같이 하여 얻어진 결과는 시간에 따른 아크의 밀도, 온도, 속도, 압력등을 알 수 있어 아크의 운동을 이해하는데 도움이 된다. 본만아니라 Gas-blast 아크와 non-blast 아크를 비교함으로써 gas-blast 효과가 아크에 미치는 주요 영향이 무엇인지 알 수 있었다.

II. 차단기 및 아크 모델

차단기의 구조적 모델은 그림 1-(a)와 같다. B 영역은 SF_6 gas 을 불어 넣는 곳이고 A 영역은 전극이며, C영역은 아크가 생기는 영역 및 SF_6 gas 가 흘러가는 영역이다. 이것을 시뮬레이션 하기위한 Computational model 은 그림1-(b)와 같다.

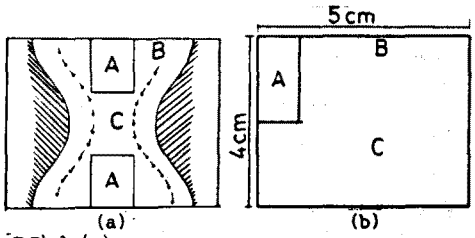


그림 1 (a) Physical Model
(b) Computational Model

아크 plasma 를 기술하는 full-Resistive MHD 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla\cdot(n\vec{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\rho\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{c}\vec{j}\times\vec{B} - \nabla P_i - \nabla\cdot\vec{\pi}_i - R_{en} - R_{in} \tag{2}$$

$$\frac{n}{\gamma-1}\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V}\cdot\nabla T\right) + nT\nabla\cdot\vec{V} = \eta\vec{j}^2 + \nabla\cdot(\vec{\kappa}\cdot\nabla T) + \nu\left[\frac{4}{3}(\nabla\cdot\vec{V})^2 + (\nabla\times\vec{V})^2\right] - U_{rad} - Q_{en} - Q_{in} \tag{3}$$

$$\vec{E} + \frac{1}{c}\vec{V}\times B = \eta\vec{j} \tag{4}$$

$$\nabla\times\vec{E} = \frac{1}{c}\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \tag{5}$$

$$\nabla\times\vec{B} = \frac{4\pi}{c}\vec{j} \tag{6}$$

$$P_i = nkT \tag{7}$$

여기서 γ 는 Specific heat ratio 을 말하며 η 는 Resistivity κ 는 thermal conductivity tensor로서 수직성분과, 수평성분을 갖게된다. ν 는 ion viscosity 을 나타내며 π 는 anisotropic stress tensor 을 나타내며 각 성분은 다음과 같다.

$$\pi_{i,\alpha\beta} = \nu\left(\frac{2}{3}\delta_{\alpha\beta}\nabla\cdot\vec{V} - \frac{\partial V_\alpha}{\partial X_\beta} - \frac{\partial V_\beta}{\partial X_\alpha}\right)$$

그리고 U는 Radiation loss 을 나타낸다. 중성 SF_6 gas 을 기술하는 유체식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} + \nabla\cdot(n_n\vec{v}_n) = 0 \qquad (8)$$

$$m_n n_n \frac{\partial \vec{v}_n}{\partial t} = -\nabla P_n - \nabla\cdot\vec{\vec{\pi}}_n + R_{en} + R_{in} \qquad (9)$$

$$\frac{n_n}{\gamma-1}\left(\frac{\partial T_n}{\partial t} + \vec{v}_n\cdot\nabla T_n\right) + n_n T_n \nabla\cdot\vec{v}_n = \nabla\cdot(\vec{\vec{\kappa}}_n\cdot\nabla T_n) + \nu_n\left[\frac{4}{3}(\nabla\cdot\vec{v}_n)^2 + (\nabla\times\vec{v}_n)^2\right] + Q_{en} + Q_{in} \qquad (10)$$

$$P_n = n_n k T_n \qquad (11)$$

이때 Momentum 과 Energy 식에서 아크 plasma 와 중성가스를 연결하는 것은 충돌이다. 충돌식은 각 입자가 smooth 하다고 가정하고 세워진 식이며 [2] 다음과 같은 표현식을 사용하였다.

$$R_{en} = n_e n_n m_{en}(\vec{V}_e - \vec{V}_n)\frac{4}{3}\sigma_{en}\left(\frac{8}{\pi}\frac{T_{en}}{m_{en}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (12)$$

$$R_{in} = n_i n_n m_{in}(\vec{V}_i - \vec{V}_n)\frac{4}{3}\sigma_{in}\left(\frac{8}{\pi}\frac{T_{in}}{m_{in}}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (13)$$

$$Q_{en} = 3n_e\frac{m_e}{m_n}(T_e - T_n)/\tau_{en} \qquad (14)$$

$$Q_{in} = 3n_i\frac{m_i}{m_n}(T_i - T_n)/\tau_{in} \qquad (15)$$

여기서

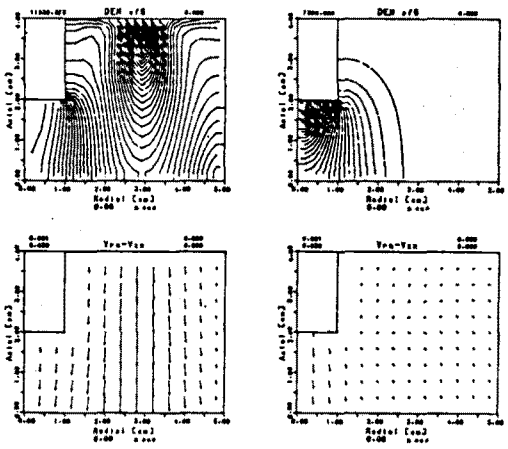
$$m_{\alpha\beta} = \frac{m_\alpha m_\beta}{m_\alpha + m_\beta}, \quad T_{\alpha\beta} = \frac{m_\alpha T_\alpha + m_\beta T_\beta}{m_\alpha + m_\beta}$$

$$\tau_{\alpha\beta} = \frac{1}{n_\beta}\frac{3}{4}\frac{1}{\sigma_{\alpha\beta}}\left(\frac{8}{\pi}\frac{T_{\alpha\beta}}{m_{\alpha\beta}}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

그리고 $\sigma_{\alpha\beta}$ 는 충돌 단면적을 나타낸다.
의 식에서 arc plasma 의 전달 상수, thermal conductivity, resistivity, viscosity 등은 plasma의 ion 의 식을 사용하였다 [2]. 중성 SF_6 gas 의 전달 상수 및 충돌 단면적 값은 주로 실험값을 사용하였다[13,14,15].
의의 식들을 풀기위해 사용된 방법은 FDM (Finite Difference Method)중에서 ADI (Alternaling Direct Implicit)방법이다. 이 방법은 다차원 문제를 푸는데 유용한 방법으로 푸는 식들이 절대적으로 수렴하게 된다.

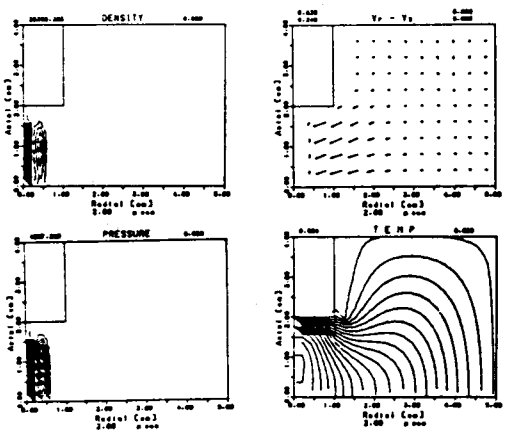
III. 결과 및 검토

아크 Plasma 의 초기 조건 및 경계조건을 살펴보면 밀도는 $35 \times 10^{11}/cm^3$, 온도는 그림 1의 C 영역이 0.5 eV, 차단기의 벽을 400°K 로 주었다. 입력초기 전류는 400 [A] 를 주었으며 매 micro second 마다 20 A 씩 줄여 가도록 하였다. SF_6 gas 의 초기조건은 그림 2-(a)와 (b)에 나타내었다.
2-(b)의 경우(Up Blast)는 전극 위쪽에서 gas 을 넣을 때의 SF_6 gas 의 형태이고 2-(b) 의 경우(electrode blast)는 전극에서 gas을 불어넣을 때의 SF_6 gas 의 형태이다. 본 논문은 가스를 불어넣지 않았을 때와 2-(a)의 경우와 2-(b)의 경우, 3가지 경우에 대해, Computer 시뮬레이션을 수행하였다.
그림 3이 2 μ sec 일때 각 경우의 결과를 나타낸 것이다. Non blast 아크현상인 3-(a)보다 Up blast 아크현상인3-(b) 경우가 밀도면에서 많이 줄어들었음을 알 수있고 electrode blast아크 현상인 3-(c) 경우는 더욱 줄어들었음을 알 수 있다.
그림 4는 5μ sec 일때 radial 거리에 따른 압력 분포를 나타낸 것인데 그림4-(a)와 그림4-(b)를 비교해 볼때 non blast 아크의 경우 radial 거리에 따른 압력 변화가 심함을 알 수 있다. 중심부근에 밀도가 밀한 부분은 high pressure 아크 부분이고, 중심부에서 벗어난 부분은 low pressure 아크 부분이다.

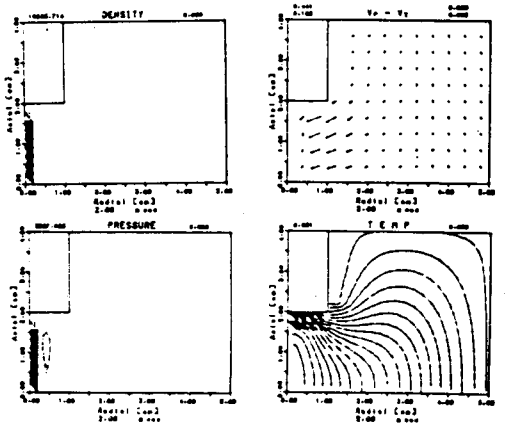


(a) (b)

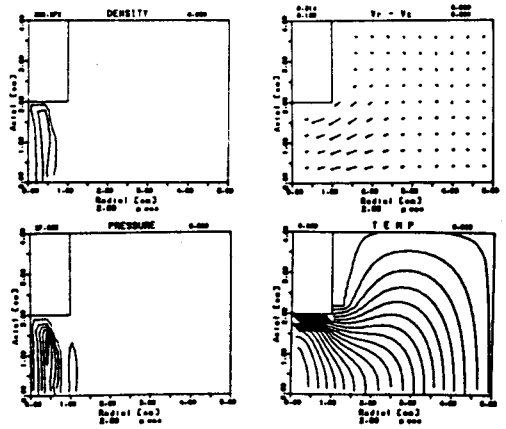
그림 2 SF_6 blast 의 초기조건,
(a) up blast, (b) electrode blast



(a)



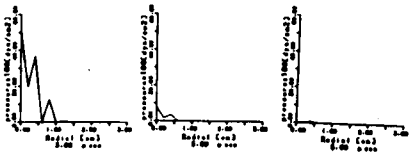
(b)



(c)

그림 3 2μSec 일때의 아크의 운동
(a) Non-blast 아크, (b)up blast 아크, (c) electrode blast아크

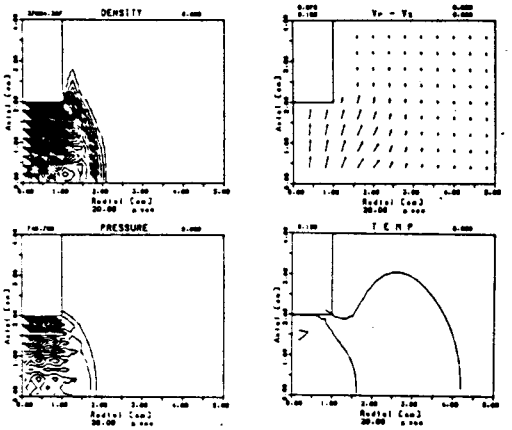
그림 3,4 와 같이 radial 거리에 따라서 밀도변화가 생기는 현상을 Filamentary Instability 라고 한다. 그림3-(b) 또는 4-(b)에 나타났듯이, blast 아크의 경우 low pressure 아크부분이 줄어듬으로 filamentary instability 가 현격히 줄어듬을 알 수 있다. 온도 분포의 경우 그림 3의 3가지 경우가 거의 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.



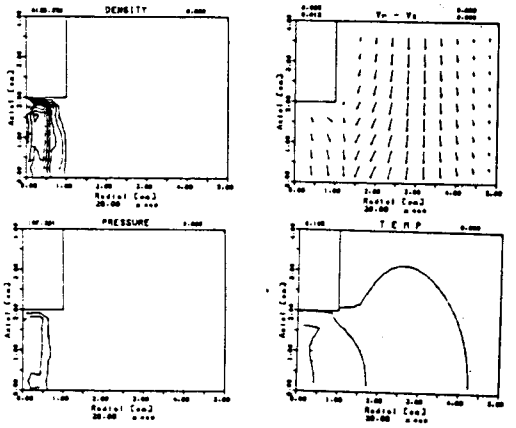
(a) (b) (c)

그림 4 5μ Sec 일때 radial 거리에 따른 압력 분포
(a) Non-blast 아크, (b) Up blast 아크 (c) electrode blast arc.

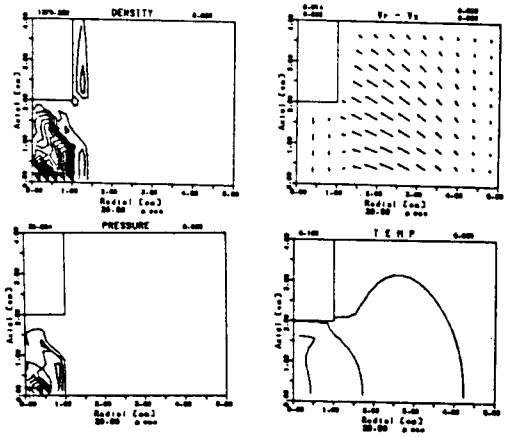
이것은 중성 가스와의 충돌에 의해 많은 양의 Momentum 을 잃어버려 속도의 절대량이 전체적으로 줄어들고, 이 영향을 받아 아크 밀도 분포가 줄어들게 된다. 하지만 gas blast 에 의해 cooling 이 빨리됨에 따라 아크 주변에서 온도차가 커지므로 아크의 이온화율이 커지게 된다.
이때 전극사이에 더 높은 전계가 필요하게 되고 일정한 전류를 유지하려면 ohmic heating 에 의해 온도가 상승하게 된다. 이와 같은 현상이 20μ sec 까지 계속일어남을 알 수 있었다. 아크의 pinching 현상을 살펴보면 2μ sec 일때 중심부로 pinching 이 됨을 알 수 있다. 이것은 아크에 가해지는 magnetic pressure 와 mechanical pressure 의 평형에 의해 나타나는 현상이다. 시간이 흐름에 따라 Magnetic pressure가 낮아지면서 아크가 확산된다. 20μ sec 일때 아크의 운동을 그림5에 나타내었다. 이때 각 경우에서 보듯 아크의 확산방향에 gas-blast 의 흐름이 영향을 주고 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5 20 μ sec 일때의 아크의 운동
(a) Non blast 아크, (b) Up blast 아크, (c) electrode blast아크

IV. 결론

이상과 같이 SF_6-blast arc 와 Non-blast arc와 비교 검토 하였다. Gas-blast 효과로 아크의 filamentary instability을 줄일 수 있다는 것과 온도보다는 Momentum 에 크게 영향을 준다는 것을 알아내었다. 또 아크의 pinching 및 확산 방향에 gas blast 가 미치는 영향도 알 수 있었다. 이와 같은 gas blast arc의 heating , cooling , diffusion등을 앎으로서 실제 차단기에서 일어나는 현상을 이해하는데 도움이 될 수 있다. 본 논문에서 살펴본 내용을 개선하기 위해서는 실제차단기에서 사용되는 nozzle 효과를 고려한 SF_6 - blast 아크의 현상과, 전력계통의 회로현상을 동시에 해석하는 연구가 필요하다.

V. 참고 문헌

[1] V.N.MALLER, M.S. MAIDU, Advances in High Voltage Insulation and Arc Interruption in SF_6 and Vacuum, Pergamen Press, 1981

[2] S.I.Braginskii, Transport Process in a Plasma "Review of Plasma Physics" Vol. 1, Consultant Bureau, N.Y.,1970.

[3] Robert D.Richtmyer, K.W.Morton, Difference Methods for Initial-Value problems, John Wiely & Sons, 1967.

[4] T.H.Lee, Physics of Engineering of High Power Switching Divices, MIT Press, 1975.

[5] B.W. Swanson, R.M. Roidt, "Some Numerical Solutions of the Boundary Layer Equations For an SF_6 Arc "Proc. IEEE, Vol. 59 No.4, 1971, pp.493.

[6] J.J. Lowke, H.C. Ludwig, "A Sample Model for High-Current Arcs Stabilized by forced Convection", J.Appl. Phys., Vol. 46, No.8, 1975,pp.3352.

[7] E.Richley, D.T. Tuma, "Free Recovery of the Gas-Blast Arc Column", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.PS-8, No.8, 1980, pp.405.

[8] D.T. Tuma, "A Comparison of the Behavior of SF_6 and N_2 Blast Arcs Around Current Zero", IEEE. Trans. PAS Vol. PAS-99, No.6, 1980, pp2129.

[9] K.Ragaller, W.Egli, K.P. Brand, "Dielectric Recovery of an Axially Blown SF_6-Arc Affer Current Zero: Part II-Theorical Investigations", IEEE. Trans. Plasma Sci, Vol. PS-10, No.3,

1983, pp154.

[10] R.R.Mitchell, "Theoretical Analysis of Dielectric Recovery in SF_6 Gas-Blast Arcs," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. PS-14, NO.4, 1986,pp384

[11] M.T.C. FANG, J.F. ZHANG, "The Dynamic Behavior of Nozzle Arcs", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol PS-14, No.4, 1986, pp350.

[12] H.IKEDA, M.ISHIKAWA, S.YANABU, "Analyses of Axial Energy Distribution in Decaying Arc of SF_6 Gas Circuit Breaker", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol PS-14, No8, 1986, pp395.

[13] A.Gleizes, M. Razafinimanana, S. Vacquie "Transport Coefficient in Arc Plasma of SF_6-N_2 Mixtures",J. Appl.Phys. 54(7), 1983,pp3777

[14] J.P.Novak, M.F. Fréchette "Transport coefficients of SF_6 and SF_6-N_2 Mixtures from Revised Data",J. Appl. Phys. 55(1), 1984, pp107.

[15] C.C. Ghizani "Characterization of free jet expansion of SF_6 Molecules" J.Appl. Phys. 61(7), 1987, pp2674.

[16] R.Ishii, Y.Umeda "Nozzle flows of gas-particle mixtures", Phys. Fluide 30(3), 1987, pp752.