

Modified FLIC법과 아크 모델을 이용한 차단부내 초기 아크 유동 해석

신승록, 김홍규, 정 현교  
서울대학교 전기공학부

The Analysis of Arc-Flow Interaction in GCB  
Using the Modified FLIC Method and the Arc Model

Seung-Rok Shin, Hong-Kyu Kim, Hyun-Kyo Jung  
School of Electrical Engineering, Seoul National University

**Abstract** - In this paper, the analysis of the gas flow in the GCB is presented by using the modified FLIC method and the arc model. The modified FLIC method has two step calculation procedure. And it adopts the upwind scheme, which results in the stability.[1] The arc model used in this paper makes arc a heating source in the energy equation. The heating source is composed of ohmic heating and radiation energy transfer. And the type of the GCB in this paper is a auto-expansion type.[2]

1. 서 론

본 논문에서는 Modified FLIC와 아크 모델을 이용하여 차단부 내의 초기 열가스유동을 해석하였다. Modified FLIC 법은 사각형 격자를 사용하는 FLIC법과는 달리 삼각형 격자를 사용하는 것이 특징이다. 따라서 임의의 형상에 대해 자유롭게 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한, FLIC법이 가지고 있는 많은 장점을 그대로 가지고 있어서 충격파가 발생하는 경우의 차단부 유동 해석에 적합한 방법이다.[1] 그리고 여기서 사용된 아크 모델은 아크를 에너지 방정식에서 일종의 열소스(heating source)항으로 취급한다. 이 열소스항은 전기적 입력에너지에서 방사(Radiation)에 의한 열전달항을 뺀 형식으로 표현된다. 그리고, 해석한 차단기는 auto-expansion식 차단기로써 아크에 의해 실린더 내부의 가스 압력이 상승하고 어느 정도 실린더 내에서 압력이 상승하면 가스가 역류하여 차단부의 아크를 소호 하는 방식의 차단기이다.[2] 본 논문에서는 참고 문헌[2]에서 다른 형상에 대해서 해석하였다.

2. 본 론

2.1 Modified FLIC법

Modified FLIC법은 FLIC법에서 이용되는 사각형 격자 대신 삼각형 격자를 이용하는 알고리즘이다. 기본적으로는 FLIC와 동일하다. 즉, 차분법에 의한 압축성 유동 해석법이며 상류 차분법을 이용하므로 안정적인 해를 얻을 수 있다. 또한, time-marching 방법을 이용한다.[1][5]

2.1.1 Modified FLIC법의 기본식

유동에 관한 지배 방정식을 보존형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial Fu}{\partial x} + \frac{\partial Fv}{\partial y} = -f \quad (1)$$

$$F = [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad \rho E]^T, f = \left[ 0 \quad \frac{\partial h}{\partial x} \quad \frac{\partial h}{\partial y} \quad \frac{\partial hu}{\partial x} \quad \frac{\partial hv}{\partial y} + S \right]^T \quad (2)$$

(여기서  $E = C_v T + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$   $C_v$  는 정적비열,  $\rho$  는 밀도,  $T$ 는 온도,  $p$ 는 압력,  $S$ 는 아크의 열입력항,  $u$ 는  $x$  방향의 속도,  $v$ 는  $y$  방향의 속도를 나타낸다.) 식 (1)을 면적분하면

$$\int_S \frac{\partial F}{\partial t} ds + \int_S \frac{\partial Fu}{\partial x} ds + \int_S \frac{\partial Fv}{\partial y} ds = - \int_S f ds + \int_S S ds \quad (3)$$

(여기서, 우변의 둘째 항은 에너지 식에만 적용된다) 이 된다. 식 (3)의 좌변을 다시 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_S F ds + \int_S \nabla \cdot (F \vec{V}) ds = \frac{\partial}{\partial t} \int_S F ds + \int_C (F \vec{V}) \cdot \hat{n} dc \quad (4)$$

(여기서  $\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j}$ ,  $\hat{n} = l\hat{i} + m\hat{j}$ ,  $l, m$  은 그림1에서와 같이 수직 외향 벡터  $\hat{n}$  의 방향여현이다) 이상을 정리하면 Modified FLIC법에서는 식(1)을 이용하여 임의의 폐곡선 내에서 면적 적분하여 정리한 다음 식을 기초 식으로 한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_S F ds + \int_C F V_n dc = - \int_C Q dc + \int_S S ds \quad (5)$$

(여기서  $V_n = lu + mv$ ,  $l, m$  은 변의 수직 외향 벡터  $\hat{n}$  의 방향여현,  $Q = [0, pl, pm, pV_n]^T$  이다.우변의 둘째 항은 에너지 식에 대해서만 적용된다.)

2.1.2 Modified FLIC법의 계산 과정

FLIC법의 다음 두 가지 특징이 있다. 하나는 계산 영역을 다수의 차분 격자로 분할할 때에 통상의 차분법에서는 격자 점에서의 상태량  $F$ (질량, 운동량, 에너지)를 평가하는 것에 반해, FLIC법에서는 각 격자 사이에 있는 요소 내의 유체가 가지고 있는  $F$ 의 평균치를 취한다. Modified FLIC법에서는 계산 영역을 삼각형 요소로 분할하여 삼각형 요소 내의  $F$ 의 평균치를 미지변수로 한다. 즉 영역을 분할한 삼각형 요소  $k$ 에서의 변수는 다음 식으로 정의된다.

$$F_k = \frac{1}{S_k} \int_{S_k} F ds \quad (6)$$

FLIC법의 두 번째 특징은 비정상 성분을 2단계의 전진차분으로 치환하는 것이다. 이 과정은 다음과 같다.

첫 번째 단계

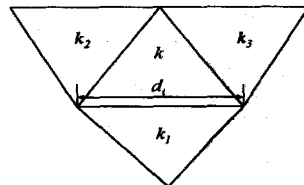


그림 1. 삼각형 요소의 기호.

그림 1과 같은 삼각형 요소에 대하여 식 (5)의 좌변 2항을 무시하면 다음 식을 얻는다.

$$\hat{F}_k = F_k^{(n)} - \frac{\partial F}{\partial S_k} \sum_{i=1}^3 Q_i^{(n)} d_i \quad (7)$$

여기서  $F_k$ 는 Lagrange 좌표 계에서의 시간  $t = n \Delta t$ 에 있어서 요소 k의 상태량(F)을 의미하며,  $S_k$ 는 요소의 면적,  $d_i$ 는 그림1에서와 같이 변의 길이 나타낸다. 또한  $Q_i$ 는 변  $i$  상에서의 Q의 값으로서, 그 변을 사이에 둔 양측 요소의 압력, 속도의 보간에 의해 구해진다. 예를 들면,  $p_i$  및  $V_{ki}$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$p_i = \frac{1}{S_k + S_{k'}} (S_k p_{k'} + S_{k'} p_k) \quad (8)$$

$$V_{ki} = l_i u_i + m_i v_i$$

이로부터  $Q_i$ 는 다음과 같이 계산되어진다.(에너지 식에서는  $H_k$ (아크 부분의 열 소스항)이 추가된다)

$$Q_i = \begin{pmatrix} 0 \\ p_i l_i \\ p_i m_i \\ p_i V_{ki} \end{pmatrix} \quad (9)$$

### 두 번째 단계

첫 번째 단계에서 얻은 Lagrange좌표 계에 있어서의 상태값을 다음 식을 이용하여 Euler좌표계의 상태값으로 계산한다.

$$\hat{F}_k^{(n+1)} = \hat{F}_k - \frac{\partial \hat{F}}{\partial S_k} \sum_i [\delta_i \hat{F}_{k'} + (1 - \delta_i) \hat{F}_k] \hat{V}_{ki} d_i \quad (10)$$

여기서  $\delta_i$ 는 차분법에서 상류차분 파라미터로서, 변  $i$ 를 통과하는 F의 내삽보간 파라미터이다. 여기서는 다음과 같다.

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & : \hat{V}_{ki} < 0 \\ 0 & : \hat{V}_{ki} > 0 \end{cases} \quad (11)$$

### 2.2 아크 모델링

아크를 원통형(반지름은 전극과 동일)의 균일한 온도와 밀도, 압력을 갖고 있는 상태로 보았다. 이 때, 압력은 주위와 동일하게 주었고, 온도와 밀도는 작은 전류(본 논문에서는 5A)를 주었을 때, 이 전류에 의한 내부에너지를 고려하여 온도와 밀도를 정했다.(온도=5000K) 각 요소에 대한 전기적 입력에너지는 유한요소법을 이용하여 구한 전계 세기와 FLIC법을 통해 얻은 전 스텝의 전기 전도도(electric conductivity)를 이용하여 구한다. 이 때, 전계 세기는 전극에서의 전류를 고려하여 구하게 된다. 방사(Radiation)에 의한 에너지 전달은 Liebermann.[4]의 논문에 나와 있는 방사 계수(Radiation Emission Coefficients)를 이용하여 방사 에너지를 고려하였다. 여기서, 10000K이하에서의 방사 계수는 압력과 아크 반지름에 거의 영향을 받지 않고 일정한 성향을 나타낸다. 이 점을 고려하여 각 셀에 대해 독립적으로 방사에너지를 고려하였다. 위의 과정을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$S_e = S_{ohm} - U \quad (12)$$

(여기서,  $S_{ohm} = \sigma (\vec{E} \cdot \vec{E})$ , U는 재흡수를 고려한 방사에너지,  $\sigma$ 는 전기 전도도)

한편, E는 전류의 보존식  $\nabla \cdot J = 0$ 에서,  $J = \sigma E$ 에 의해 다음과 같은 관계식을 통해 얻는다.[3]

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (13)$$

(여기서,  $E = -\nabla \phi$ 로서,  $\phi$ 는 전기 포텐셜)

그리고,  $U = 4\pi \epsilon_N$ 로서  $\epsilon_N$ 은 아크에 의한 재흡수가 고려된 방사 계수이다.[3][4]

### 2.3 해석 결과

본 논문에서 해석한 모델은 다음과 같다.

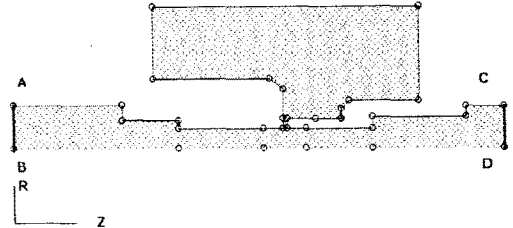


그림 2. 본 논문에서 해석한 차단기의 개략도

직선 BA는 r방향, 직선 BD는 z방향이다. AB와 CD는 개방 경계 조건을 주었고, 나머지 경계는 벽 경계 조건을 주었다. 위의 공간이 실린더이다.

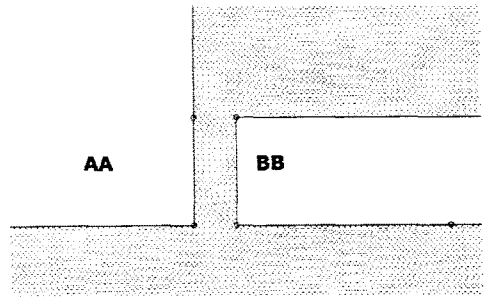


그림 3. 위 차단기의 차단부

그림 3은 위 그림 2의 가운데 차단부를 확대한 것이다. AA는 고정전극이고 BB는 이동 전극이다.

시간 간격을  $10^{-9}$ (sec)으로 하고, 10,20,40(μs)에 대한 결과를 출력하였다. 이 시간 동안, 전류를 일정하게 놓고(20KA,25KA 두 경우에 대해서 해석을 했음) 차단부를 중심으로 SF6가스의 온도, 압력, 밀도, 속도에 대해서 결과를 구했다. 먼저, 전류가 20KA일 때의 속도와 압력의 분포도이다.(time=40 μs)



그림 4. 차단부의 속도 분포(I=20KA)

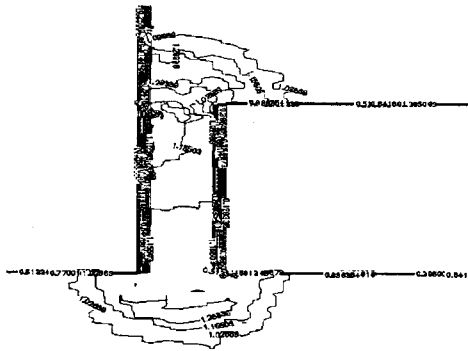


그림 5. 차단부의 압력 분포(1.0=2atm)

다음은 전류를 25KA로 했을 때의 속도와 압력의 분포도이다. (time=40  $\mu$ s)

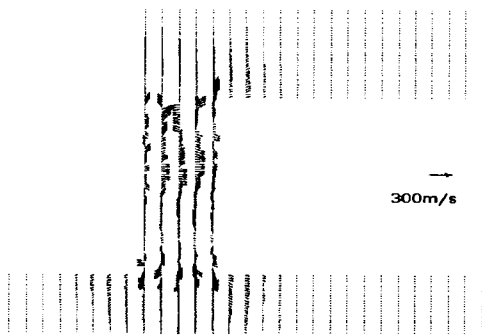


그림 6. 차단부의 속도 분포(I=25kA)

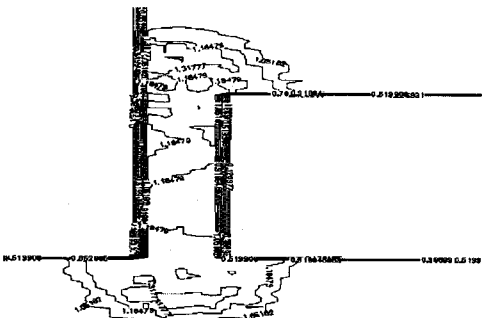


그림 7. 차단부의 압력 분포(1.0=2atm)

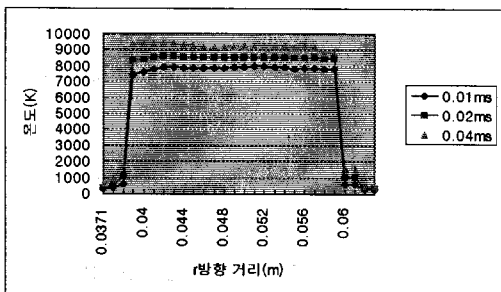


그림8.r방향에 따른 온도 분포(I=25KA, z=0.56m)

그림 8과 9는 전류가 25KA 일 때의 10,20,40( $\mu$ s)에 대한 온도와 밀도 분포를 나타낸 그림이다. 즉, 전극 가운데(z=0.56m)를 지나는 단면에 대해서 r방향의 변위에 대한 값을 나타낸 것이다.

r=0.04(m)에서 0.06(m)까지는 전극에 해당하는 부분이다. 그림 8,9의 온도와 밀도 분포에 의해 실린더 쪽으로부터 대칭축 쪽으로 고온의 아크 부분이 이동된 것을 볼 수 있다. 이것은 실린더 쪽이 막혀 있는 반면, 대칭축의 양쪽으로 개방되어 있는 결과로서 물리적인 의미에서 합당하다고 하겠다.

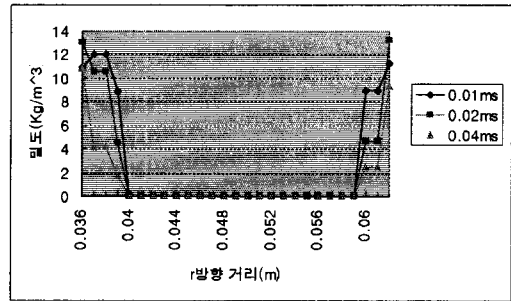


그림 9.r방향에 따른 밀도 분포(I=25KA, z=0.56m)

### 3. 결 론

본 논문에서는 Modified FLIC법과 아크 모델을 이용하여 auto-expansion 차단기[2]의 차단부내 아크 유동에 대해서 해석하였다. 본 해석을 통해 40  $\mu$ s까지의 아크 유동의 속도와 압력, 온도, 밀도의 분포를 알 수 있었고, 축방향으로의 아크 부분의 이동을 확인할 수 있었다.

### (참 고 문 헌)

- [1]김홍규 의 2인, "Modified FLIC법을 이용한 GCB내의 유동 해석프로그램 개발", 98년 초고압 기기 추계 심포지엄 논문집, 1998
- [2]P. Scarps, B.Dauby, J.M.Defise, M.Barrault and G. Bernard, " SF6 Auto-expansion Circuit Breaker Design: Numerical and Experimental Investigations of Arc-Gas Interactions ", IEEE Tran. Power Delivery, Vol.7, No.1, January 1992
- [3]X.D.Zhang, J.Y.Trepanier, R.Camarero, " Modeling and Computation of Arc-Flow Interaction in Circuit-Breakers", Comp.Fluid Dyn. ,Vol. 2,pp.41-64 ,1994
- [4]R.W.Liebermann, J.J. Lowke, " Radiation Emission Coefficients for Sulfur Hexafluoride Arc Plasma", J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. Vol.16. pp. 253-264, 1976
- [5]R.A.Gentry, R.E. Martin, "An Eulerian Differencing Method for Unsteady Compressible Flow Problems ", J. of Computational Physics, pp.87-118, 1966