

Modified FLIC법과 아크 모델을 이용한 차단기 내의 아크 유동 해석

論 文

49B-3-7

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

辛承錄* · 金烘樞** · 鄭炫毅***

(Sung-Rok Shin · Hong-Kyu Kim · Hyun-Kyo Jung)

Abstract - In this paper, the analysis of the arc-flow in the GCB is presented by using the modified FLIC method and the arc model. The modified FLIC method adopts the upwind scheme and requires short calculation time. The arc model used in this paper treats the arc as a energy source in the energy equation. The energy source is composed of the ohmic heating and the radiation energy transfer. At each step, the movement of electrode is simulated. From the simulation, reasonable results can be obtained.

Key Words : 차단기, SF₆, 아크 모델, modified FLIC법, radiation heat transfer

1. 서 론

송배전 계통에 쓰이는 차단기는 차단부의 내부에 발생하는 아크를 소호하는 방식에 따라 puffer식 차단기, auto-expansion식 차단기 등 여러 가지로 나뉘어 진다. 본 논문에서 해석한 차단기는 auto-expansion식 차단기로서 차단 시에 발생하는 아크에 의해 실린더 내부의 절연 가스의 압력이 상승하고 이 압축된 가스에 의해 다시 차단부 내의 아크를 소호하는 방식의 차단기이다. 즉 외부로부터의 힘이 작용함이 없이 아크 자체의 에너지를 이용한 차단방식이라 하겠다.[1] 본 논문에서는 참고문헌[2]에서 다른 형상에 대해서 해석하였다.[2]

차단부 내에서 발생하는 아크를 포함한 가스, 이른바 열 가스를 해석하기 위하여 Modified FLIC법과 아크 모델을 이용하였다. 또한, 시간흐름에 따른 전극 이동을 모의하여 적용하였다. Modified FLIC법은 정렬된 사각형 격자를 사용하는 FLIC법과는 달리 임의의 삼각형 격자를 사용한다. 따라서, 임의의 형상에 대해 자유롭게 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 계산시간은 짧고 해의 정확도는 높은 것으로 알려져 있다.[3] 그리고 상류 차분법을 사용하기 때문에 안정적이다. 따라서 이 방법은 충격파가 발생하는 경우의 차단부 유동해석에 적합한 방법이라 할 수 있다.[3]

본 논문의 아크 모델에서는 아크를 에너지 방정식에서 일

종의 열소스(heating source)항으로 취급하였다. 이 열소스 항은 전기적 입력에너지에서 방사(Radiation)에 의한 열전달 항을 뺀 형식으로 표현된다. 각 요소에서의 전기적 입력에너지는 FEM해석을 통한 전기적 세기를 찾아 구했다. 또한 시간의 흐름에 따른 전극의 이동을 9단계로 나누어 모의하였다. 전극 이동을 더 세분하여 모의하여야 하겠지만 이와 같은 정도로서 나누어서 모의하여도 크게 차이가 나지 않는 것으로 알려져 있다.[8] 각 단계에서는 전극을 고정시키고 해석하였다.

2. 본 론

2.1 Modified FLIC법

Modified FLIC법은 FLIC법에서 사용되는 정렬 사각형 격자 대신 삼각형 격자를 이용하는 알고리즘이다. 기본적으로는 FLIC법과 동일하다. 즉, 일종의 차분법에 의한 압축성 유동 해석법이다. 상류 차분법을 사용하기 때문에 안정적인 해를 얻을 수 있으며, time-marching방법을 이용하고 있다. 삼각형 격자를 사용하기 때문에 임의의 형상에 적용할 수 있다.[3]

2.1.1 Modified FLIC법의 기본식

유동에 관한 지배 방정식을 보존형으로 나타내면 다음과 같다.

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

* 準 會 員 : 서울大 電氣工學部 碩士課程

** 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程(修了)

*** 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 10月 18日

最終完了 : 2000年 2月 14日

여기서 $F = [\rho \ \rho u \ \rho v \ \rho E]^T$,

$$f = \left[0 \ \frac{\partial p}{\partial x} \ \frac{\partial p}{\partial y} \ \frac{\partial \rho u}{\partial x} \ \frac{\partial \rho v}{\partial y} + S \right]^T \quad (2)$$

(여기서, $E = C_v T + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$, C_v 는 정적비열, ρ 는 밀도, T 는 온도, p 는 압력, S 는 아크에 의한 열입력항, u 는 x방향의 속도, v 는 y방향의 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 두 번째 항은 에너지 식에서만 적용된다.)

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 그림 1에서와 같이 수직 외향 벡터 \hat{n} 의 방향여현이다.)

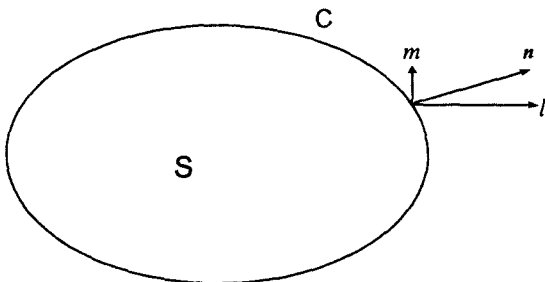


그림 1 적분 영역 및 수직 외향 벡터
Fig. 1 Definition of sub-domain and outward unit normal vector

Modified FLIC법에서는 식(1)을 임의의 폐곡선 내에서 면적 적분하여 정리한 다음 식을 기초식으로 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, $Q = [0, \ p_l, \ p_m, \ pV_n]^T$ 이다. 우변의

둘째 항은 에너지 식에 대해서만 적용된다.)

2.1.2 Modified FLIC법의 계산 과정

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

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

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

첫 번째 단계

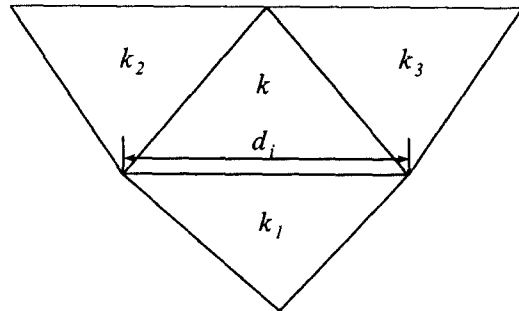


그림 2 삼각형 요소의 기호
Fig. 2 Definition of triangle element dimension

그림 2와 같은 삼각형 요소에 대하여 식 (5)의 좌변 두 번째 항을 무시하면 다음 식을 얻는다.

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

여기서 F_k 는 Lagrange 좌표계에서의 시간 $t = n \delta t$ 에 있어서 요소 k의 상태량(F)을 의미하며, S_k 는 요소의 면적, d_i 는 그림1에서와 같이 변의 길이를 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.

$$d_i = \frac{1}{S_k + S_{ki}} (S_k p_{ki} + S_{ki} p_k) \quad (8)$$

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

이로부터 Q_i 는 다음과 같이 계산되어 진다.(에너지 식에서는 H_k (아크 부분의 열소스항)가 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 번째단계에서 얻은 Lagrange 좌표계에 있어서의 상태값을 다음 식을 이용하여 Euler 좌표계의 상태값으로 계산한다.

$$F_k^{(n+1)} = \widehat{F}_k - \frac{\delta t}{S_k} \sum_i [\delta_i \widehat{F}_{ki} + (1 - \delta_i) \widehat{F}_k] \widehat{V}_{ki} d_i \quad (10)$$

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

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

2.2 아크 모델

처음 계산을 시작하기 전의 아크를 파이프 모양(안쪽, 바깥쪽 반지름은 전극과 동일)의 균일한 온도와 밀도를 갖고 있는 상태로 보았다. 이 때, 압력은 주위와 동일하게 주었고, 온도와 밀도는 작은 전류(본 논문에서는 0.3A)를 주었을 때, 이 전류에 의한 내부에너지를 고려하여 온도와 밀도를 정했다. 왜냐하면 큰 전류를 줄 경우 수치적으로 불안정한 경향을 보이고, 실제 전류를 차단하는 과정에 있어서도 초기 짧은 시간 동안에는 작은 전류가 흐를 것이라고 짐작되어지기 때문이다.

1000K이상의 온도에서 SF_6 가스는 이상기체 상태방정식을 만족하지 않으므로, 이 때의 밀도, 온도, 압력 등의 상태량은 SF_6 가스에 대한 데이터를 통해서 구하는 형식을 사용했다. 이 데이터는 온도와 압력에 대해서 밀도와 전기전도도 그리고 엔탈피의 변화값이 나와 있다. 이 데이터를 밀도와 엔탈피에 대한 데이터로 전환하여 1000K이하에서는 이상기체 상태방정식을 통해서 온도와 압력을 구하였고, 1000K이상에서는 이 데이터를 통해서 밀도와 엔탈피에 대해 내삽 보간하는 형식으로 온도와 압력을 구했다.

각 요소에 대한 전기적 입력에너지는 유한요소법을 이용하여 구한 전계 세기와 FLIC법을 통해 얻은 전 스텝의 전기전도도(electric conductivity)를 이용하여 구한다. 즉, 각 요소의 전계 세기는 전극에 일정한 전압이 걸려 있다고 가

정하고 FEM 해석을 통해 구한 다음, 각 요소의 전기 에너지의 합과 입력되는 전기에너지가 같다는 관계를 통해 전압을 구한다. 이 전압의 값을 통해 최종적인 각 요소의 전계 세기를 알게 되고, 이와 함께 전 스텝의 전기전도도를 갖고 각 요소의 전기적 입력에너지를 구하게 된다. 이 과정에서 각 요소의 전기 전도도는 서로 다르며, 각 요소의 전기 전도도를 독립적으로 식(15)에서 고려한다. 방사(Radiation)에 의한 에너지 전달은 Liebermann.[4]의 논문에 나와 있는 방사 계수(Radiation Emission Coefficients)를 이용하여 방사 에너지를 고려하였다.

에너지 방정식에서 열소스항으로 입력되는 부분을 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

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

(여기서, $S_{ohm} = \sigma \left(\vec{E} \cdot \vec{E} \right)$, U는 재흡수를 고려한 방사에너지, σ 는 전기전도도)

2.2.1 각 요소의 전계 세기를 얻기 위한 FEM해석

본 논문에서는 전류의 주파수를 50Hz라 하였다. 본 해석에서 한 시간 스텝을 10^{-7} sec이라 하였으므로, 그 순간에서는 직류의 전류가 흐른다고 보아도 무방하다. 즉, 각 요소에 대해서,

$$\nabla \cdot J = 0 \quad \text{즉,} \quad \nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (13)$$

이 성립한다. 여기서, 전류밀도 J는 $J = \sigma E$ 로서, 전계 세기 \vec{E} 는 전기 포텐셜 ϕ 에 의해, $E = -\nabla \phi$ 로 표현된다. 따라서 위의 식(13)과 같은 기본식을 얻을 수 있다. 이를 통해, 요소 계수 행렬을 구성하여 고정 경계조건(Dirichlet B.C)을 주고 정리하면 다음과 같은 형식의 행렬식을 구성하게 된다.

$$[S_{ij}] [\phi_j] = [F_i] \quad (14)$$

$[S_{ij}]$ 는 해석영역 전체의 요소 행렬이고, $[\phi_j]$ 는 각 절점에서의 전기포텐셜(또는 전압), $[F_i]$ 는 구동 벡터가 된다. 각 절점에서의 전기포텐셜을 구하게 되면, 단위 전압(1V)이 걸렸을 때의 각 요소의 전계 세기를 $E = -\nabla \phi$ 를 통해 구하게 된다. 한편, 각 요소의 전기적 에너지의 합은 전극 사이의 전압과 전류의 곱과 같기 때문에 다음과 같은 식이 성립한다.

$$V \times I = \sum \sigma_e E_e^2 V^2 \delta V_e \quad (15)$$

(여기서, δV_e 각 요소의 부피, V는 전극 사이에 걸리는 전압, σ_e 는 전 스텝의 전기 전도도)

이를 통해 전극 사이의 전압 V를 구하게 되고, 결국 각 요소의 전계 세기 $E_e V$ 를 구하게 된다. 곧, 각 요소의 부피 당 전기적 입력에너지 $\sigma_e E_e^2 V^2$ 를 얻게 된다.

2.2 재흡수가 고려된 방사에너지

식(12)에서 U는 재흡수가 고려된 방사에너지로서, 다음과 같다.

$$U = 4\pi \epsilon_N \times P \quad (16)$$

여기서, ϵ_N 은 Liebermann.[4]의 논문에 나와 있는 방사계수(Radiation Emission Coefficients)를 이용하였으며, 이것은 1기압을 기준 했을 때의 수치이다. 본 논문에서는 방사계수가 압력에 비례한다고 가정하여, 1기압을 기준하여 압력에 대해 위와 같이 방사계수가 나오는 형식을 사용하였다. 방사에너지가 압력에 대해 비례한다고 보는 이유는 논문[4]에서 방사계수가 압력에 비례하는 성향을 보이고 있는데 이를 반영하기 위한 것이다.

2.3 전극 이동 시뮬레이션

8ms시간 동안의 전극 이동을 모의했다. 전극은 이 시간 동안 2m/s의 일정한 속도로 움직인다고 가정하였다. 한편, 8ms의 시간을 9단계로 나누었으며, 2단계와 3단계는 각각 0.5ms를, 나머지 단계에서는 각각 1ms의 시간을 할당하였다. 각 단계에서는 전극은 일정한 위치에 놓이게 되며, 나만 전 단계에서 다음 단계로 넘어갈 때만 전극이 이동하게 된다. 이 때 전극의 이동 결과 새로 생긴 요소의 상태량을 바꾸 하고 있는 요소의 상태량을 사용하여 초기치를 정하도록 하였으며, 나머지 요소의 상태량의 초기치는 자기가 위치하고 있는 요소의 상태량을 그대로 사용하도록 하였다. 지금까지의 계산 과정을 순서도로 나타내면 다음과 같다.

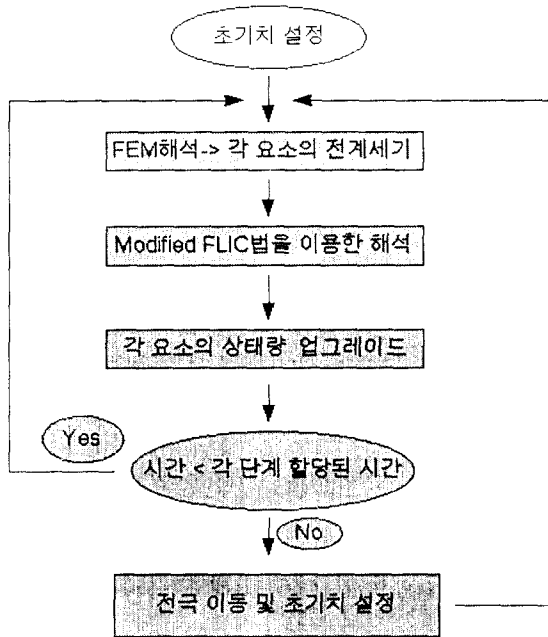


그림 3 전체 계산 순서도
Fig. 3 Flowchart of the analysis procedure

2.4 해석 결과

본 논문에서 해석한 모델은 다음과 같다.

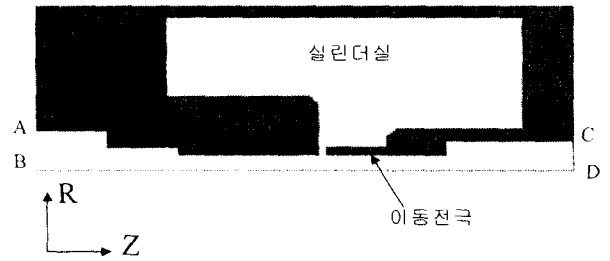


그림 4 본 논문에서 해석한 차단부의 모습
Fig. 4 Model of circuit breaker

직선 BA는 r방향, 직선 BD는 z방향이다. 특히, 직선 BD는 중심 축을 이룬다. AB와 CD는 개방 경계 조건을 주었고, 나머지 경계는 벽면 경계 조건을 주었다. 위의 공간이 실린더이다.

그림 5는 위 그림 4의 가운데 차단부를 확대한 것이다. AA는 고정전극이고 BB는 이동 전극이다. 위의 형상은 실제 차단부의 형상으로서 특별한 모델링 없이 있는 그대로의 형상을 적용하였다.[2]

그림 6은 전류 곡선을 나타내고 있다. 본 논문에서는 논문[2]에서 다룬 실험 데이터를 이용하기 위하여 주파수가 50Hz이고 전류 최대치가 6.4(kA)인 전류를 다루었으며, 시간은 전류가 0(kA)인 시점을 0(sec)라 할 때, 2.0×10^{-3} (sec)를 시작점으로 하여 10.0×10^{-3} (sec)까지로 하였다. 그림 6의 전류 곡선은 논문[2]에서 적용한 것을 사용하였다.

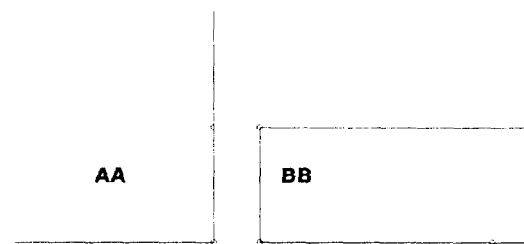


그림 5 차단부의 전극
Fig. 5 Electrode shape in circuit breaker

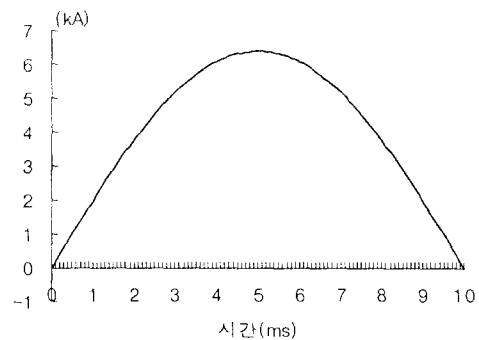


그림 6 본 논문에 적용된 전류 곡선 (Imax=6.4 kA)
Fig. 6 Current wave form (Imax=6.4 kA)

그림 7은 Modified FLIC법에서 사용된 요소 분할도를, 그림 8은 FEM을 이용하여 얻은 등전위선 분포를 나타낸다. 그림 7은 4단계에 해당하는 즉, $4 \sim 5 \times 10^{-3}$ (sec)에 해당하는 분할도이고, 그림 8은 1.5×10^{-3} (sec)에서의 등전위선 분포이다.

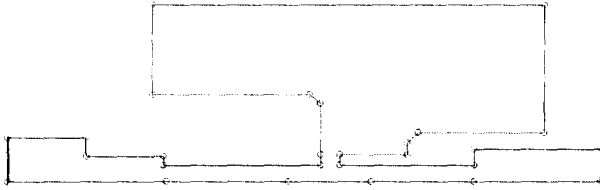


그림 7 Modified FLIC해석을 위한 요소 분할도
Fig. 7 Generated meshes for analysis

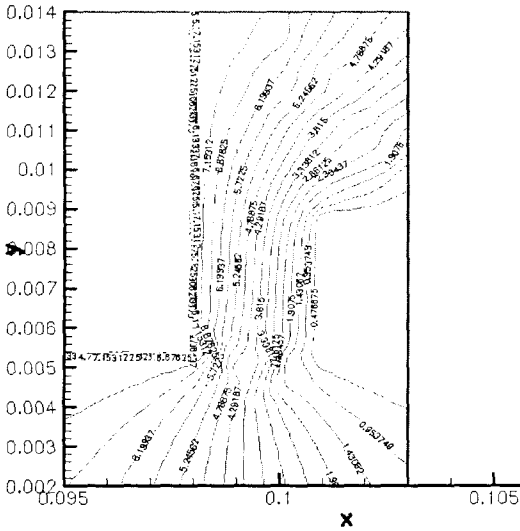


그림 8 전극 주변의 등전위선 분포 (시간: 1.5 [ms])
Fig. 8 Equi-potential lines (time : 1.5[ms])

SF_6 가스의 초기 압력과 온도, 밀도는 아크영역을 제외한 나머지 부분에 대해서는 1기압, 330(K)라 하였으며, 이상기체라고 가정하여 밀도를 구하였다. 아크영역은 고온의 가스로 이루어진 부분이므로 이 부분의 압력과 온도를 1기압, 4000(K) 이라고 가정하였고, 밀도와 전기 전도도는 SF_6 가스에 대한 데이터를 통해 얻었다.

다음은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 2(ms)~10(ms) 동안의 과정을 9단계로 나누어 각 단계마다 전극을 이동하여 해석하였다. 차단부 주변의 온도, 속도 분포를 1.5ms, 3ms, 5ms, 7ms에 대해서 나타내었다.

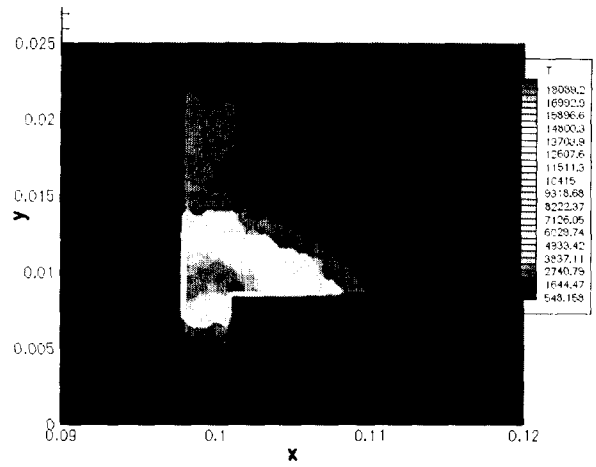


그림 9 전극 주변의 온도 분포(시간: 1.5 [ms])
Fig. 9 Temperature distribution (time : 1.5[ms])

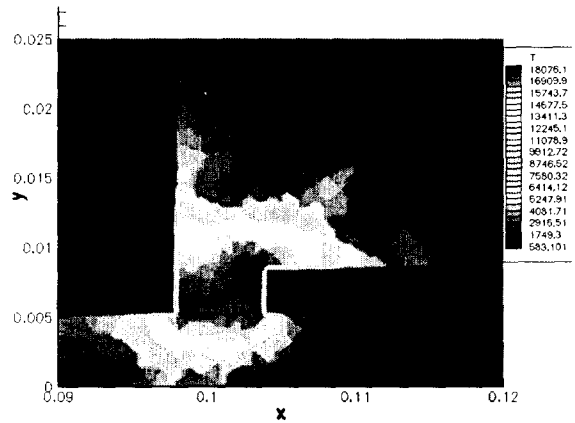


그림 10 전극 주변의 온도 분포(시간: 3.0 [ms])
Fig. 10 Temperature distribution (time : 3.0[ms])

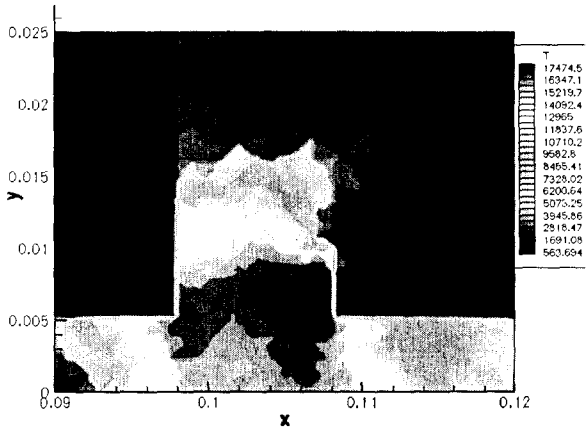


그림 11 전극 주변의 온도 분포(시간: 5.0 [ms])
Fig. 11 Temperature distribution (time : 5.0[ms])

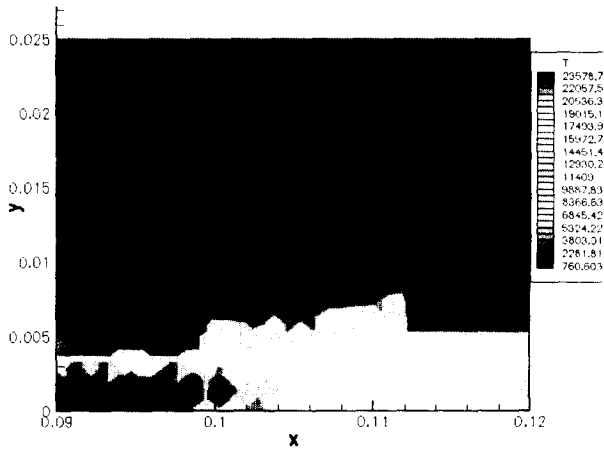


그림 12 전극 주변의 온도 분포(시간: 7.0 [ms])
 Fig. 12 Temperature distribution (time: 7.0 [ms])

그림 9를 통해서 초기에 전극 사이에 고온의 아크가 발생하였음을 알 수 있다. 즉, 4000K 이상의 부분이 아크 부분으로서 이 부분을 통해 전류가 계속 흐르게 된다. 이 아크는 전류가 커짐에 따라 영역이 넓어지다가(그림 10참고) 5ms 이후에서는 중심축 방향으로 이동하는 모습을 보이고 7ms 이후에서는 노즐 부분으로 빠져나가는 모습을 보이고 있다.

그림 13은 초기 아크에 의한 절연 가스의 흐름을 보여 주고 있다. 실린더 쪽으로 유동이 발생하고 있다. 이로 인하여 실린더 내부에 절연 가스가 압축되고, 약간의 역류 현상이 그림 14에서 보여 진다. 그림 15에서 볼 수 있듯이 5ms 이후에서는 실린더에서 노즐 방향으로의 흐름이 완연하게 나타나고 있으며, 7ms(그림 16 참고)이후에서는 대부분의 열 가스가 중심축을 따라 노즐 쪽으로 진행함을 알 수 있다.

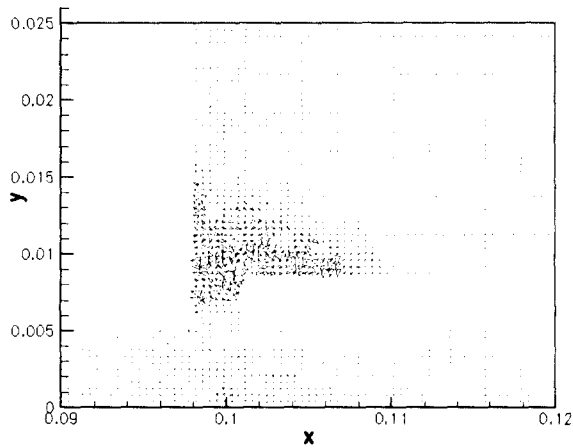


그림 13 전극 주변의 속도 분포(시간: 1.5 [ms])
 Fig. 13 Velocity distribution (time : 1.5[ms])

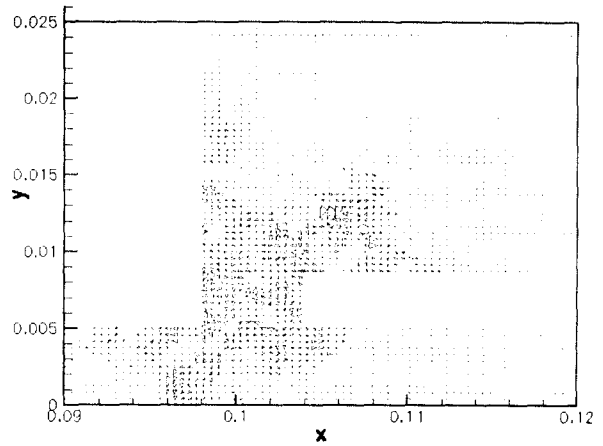


그림 14 전극 주변의 속도 분포(시간: 3.0 ms)
 Fig. 14 Velocity distribution (time : 3.0[ms])

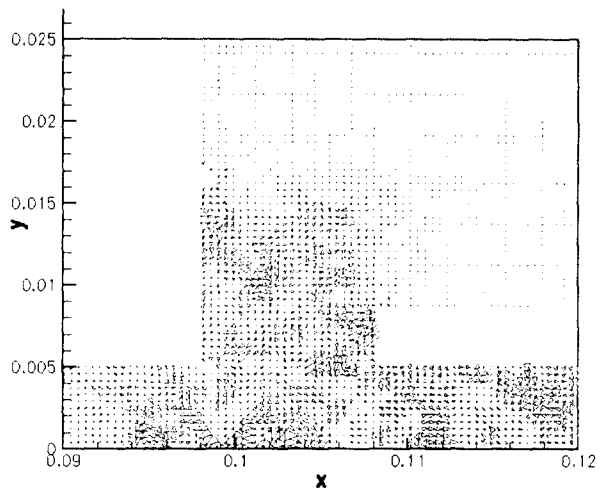


그림 15 전극 주변의 속도 분포(시간: 5.0 [ms])
 Fig. 15 Velocity distribution (time: 5.0[ms])

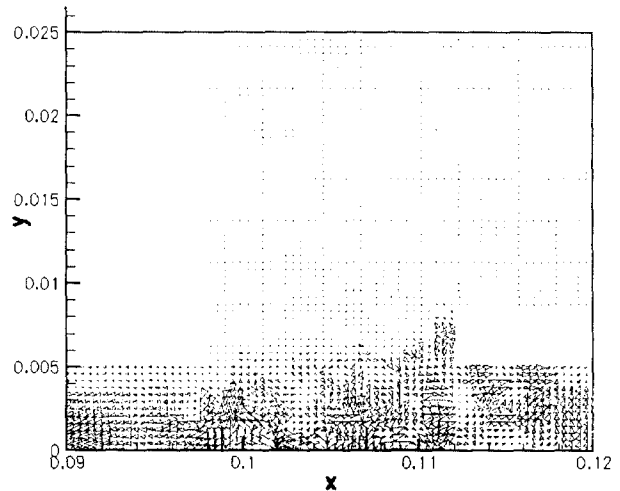


그림 16 전극 주변의 속도 분포(시간: 7.0 [ms])
 Fig. 16 Velocity distribution (time : 7.0[ms])

본 데이터의 타당성을 검증하기 위해 논문[2]에 나와 있는 실험 데이터와 비교하였다. 논문[2]에서는 전극에 걸리는 전압과 노즐 상단 부분의 압력이 실험데이터로 주어져 있다. 그림 17에서 전압이 0이 되는 것은 식(15)을 통해 전압을 구하는 과정에서, 아크 영역의 전기전도도가 0이 될 때, 전압이 0이 되도록 처리를 했기 때문이다. 위의 결과와 그림 17을 통하여 아크에 의해 실린더의 SF₆ 가스가 압축된 후, 이 압축된 가스에 의해 다시 아크가 소호되는 현상을 확인할 수 있었다.

실험값과는 어느 정도 차이를 보이고 있으나, 전체적인 경향은 비슷하다고 볼 수 있다. 여기서 그림 17, 18의 실험값과 해석값의 차이는 두 차단기의 크기가 서로 다르기 때문이다. 본 논문에서 해석한 차단기의 차단부의 크기는 논문[2]의 실험에 사용된 차단기의 것과 단지 전체적인 형상에서 일치할 뿐, 크기는 전혀 다르다. 따라서 값 자체를 비교하는 것은 큰 의미가 없으며 단지, 값이 비슷한 양상을 보인다는 측면에서 타당한 결과라고 할 수 있다. 그림 18에서의 압력 측정 지점은 (그림 4참고) 고정전극 아래 중심축 상의 지점으로서 선분 AB와 고정 전극 끝과의 중간 지점이다.

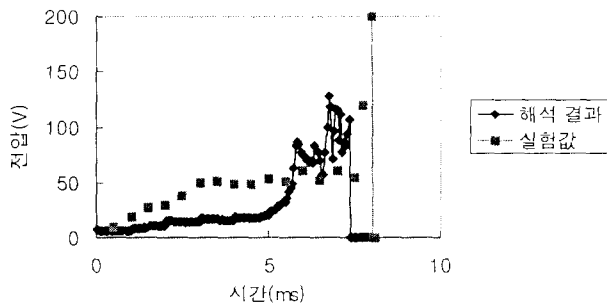


그림 17 아크 전압 비교
Fig. 17 Comparison of the arc voltage

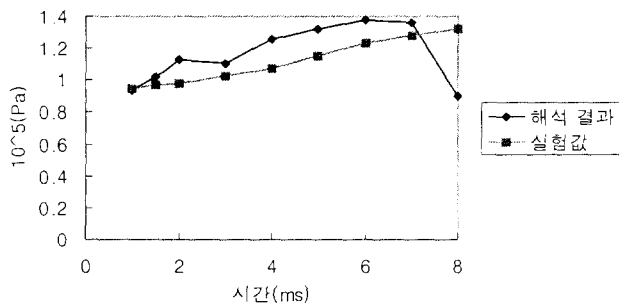


그림 18 노즐 상단 부분의 압력 비교
Fig. 18 Comparison of the pressure around nozzle

3. 결 론

본 논문에서는 Modified FLIC법과 아크 모델을 적용하여 차단시의 차단부 내의 아크 유동을 해석하였다. 또한, 시간 경과에 따른 전극 이동을 모의하였다. 이를 통해 시간 경과에 따른 차단부 내의 아크를 포함한 부분의 온도와 밀도, 압력, 속도를 알 수 있었으며 그 결과는 예상과 일치하였다. 즉, 초기에는 실린더 내부의 절연 가스가 압축되는 현상을 보이다가 이 가스가 역류하여 아크가 소호 되는 현상을 보였다. 또한, 논문[2]에 나와 있는 실험 값과 비교하였으며, 타당성 있는 결과임을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] G. Bernard, P.Malkin, W.Legros, "An SF₆ Breaker using the autoexpansion principle", IEEE Trans. on Power Delivery", vol 3, pp1739-1744, October 1988.
- [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 Trans. on Power Delivery, Vol.7 , No.1, January 1992
- [3] 김홍규 외 2인, "Modified FLIC법을 이용한 GCB내의 유동 해석프로그램 개발", 98년 초고압 기기 추계 심포지엄 논문집, 1998
- [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
- [6] 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
- [7] 신승록, 김홍규, 정현교, "Modified FLIC법과 아크 모델을 이용한 차단부내 초기 아크 유동 해석", 1999년 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1999 .7.
- [8] K.Suzuki, H.Ikeda, H.Mizoguchi, Y.Ozaki, S.Yanabu, " Investigation of Interruption Performance of Newly Developed 300kV 3-Phase-in-one-tank-type GCB and its Application to a Reduced Size GIS", IEEE, 1988 WM 228-9.

저 자 소 개

신 승 록 (辛 承 錄)

1973년 출생. 1998년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사).
현재 서울대 공대 전기공학부 대학원 석사과정
Tel: 02-880-7262
E-mail : ssr2@snu.ac.kr



정 현 교 (鄭 炫 敎)

1955년생. 1979년 서울대 공대 전기공학과
졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업
(공학). 1987년-1989년 뉴욕 Polytechnic
Univ. 객원 교수. 1984년-1993년 강원대 전
기공학과 부교수. 현재 서울대 전기공학
부교수
Tel : 02-880-7242
E-mail : hkjung@snu.ac.kr



김 홍 규 (金 烘 楯)

1969년 출생. 1995년 서울대 공대 전기공
학과 졸업(학사).1997년 서울대 공대 전기
공학부 대학원 졸업(석사). 현재 서울대
공대 전기공학부 대학원 박사과정
Tel : 02-880-7262
E-mail : khk@eesri-10.snu.ac.kr