

Puffer식 차단기 내의 냉가스 유동 해석

Analysis of the Cold Gas Flow in Puffer Type Circuit Breaker

金 烘 權* · 辛 承 錄** · 鄭 炫 毅*** · 金 斗 星§ · 權 奇 永§

(Hong-Kyu Kim · Seong-Rok Shin · Hyun-Kyo Jung · Doo-Sung Kim · Ki-Yeoung Kweon)

Abstract - There are many difficult problems in analyzing the gas flow in puffer type circuit breaker such as complex geometry, moving boundary, shock wave and so on. To predict the interruption performance accurately, these should be considered in the simulation. In this paper, the analysis procedure of the cold gas flow in the circuit breaker is presented. Euler equation is solved by FVFLIC method which is an explicit time difference scheme for an unsteady flow computation. Moving boundaries are treated with a cell elimination-addition technique. The pressure and density in front of piston are calculated from the rate of the cell volume change. The presented method is applied to the real circuit breaker model and the pressure in front of the piston is good agreement with the experimental one.

Key Words : circuit breaker , moving boundary , shock wave , Euler equation , FVFLIC method

1. 서 론

차단기는 정상 상태에서는 전류를 통전시키는 도체 역할을 하며, 사고 발생시에는 사고 전류를 차단하기 위한 전기적 절연체 역할을 한다. 파퍼(puffer)식 가스 차단기는 대용량, 소형화가 가능하기 때문에 초고압 전력 계통에서 널리 사용되고 있으며, 이 형태의 차단기는 실린더 내의 SF6 가스의 압축에 의해 압력이 증가되며, 증가된 압력을 유효하게 이용하여 아크를 소호시키는 원리[1]로 동작된다.

차단부 내에서 일어나는 아크 소호 메카니즘은 아크와 가스 유동의 상호 작용에 의해 매우 복잡하며 차단기의 최적 설계를 위해서는 이러한 아크 현상을 고려한 유동 해석이 필수적이다[2,3,4]. 이는 차단 특성에 직접적인 영향을 미치는 것이 차단부 내의 밀도 및 압력 분포이며 이러한 분포는 유동 해석을 통해서 얻을 수 있기 때문이다.

차단부 내의 유동 해석은 크게 냉가스 유동 해석과 열가스 유동 해석으로 나눌 수 있다. 냉가스 유동 해석은 아크가 존재하지 않는 무부하의 경우 차단부 내의 유동장 해석을 위한 것이며, 소전류 차단 특성 해석 등 아크에 의한 영향이 크지 않은 경우에 적용된다. 열가스 유동 해석은

BTF(Bus Terminal Fault), SLF(Short Line Fault) 등 차단 전류가 커서 아크에 의한 영향이 지배적인 경우에 적용된다.

본 논문에서는 차분법의 한 방법인 FVFLIC(Finite Volume Fluid In Cell)법[5]을 이용하여 가동부를 고려한 차단부 내의 냉가스 유동 해석 과정을 설명하고, 실제 차단기 모델에 적용하여 실린더실의 압력 상승치를 실험결과와 비교하였다. FVFLIC법은 유한 요소법에서의 마찬가지로 임의 형상의 요소를 사용할 수 있기 때문에 형상 표현이 자유로우며, 표준 FLIC법[6]이 가지는 여러 가지 특징을 모두 가지고 있기 때문에 충격파가 발생하는 차단부 내 유동 해석에 적합한 방법이다. 즉 상류 차분법을 사용하기 때문에 안정적이며, 계산 시간이 짧은 반면에 해의 정확도를 유지할 수 있는 등의 장점이 있다.

차단 과정에서 실린더실의 압축은 피스톤과 실린더 간의 상대운동에 의해 이루어지며, 실제 이동은 노즐 및 가동 전극이지만, 형상이 비교적 간단한 피스톤과 고정 전극이 이동하는 것으로 가정하는 것이 해석상 편리하다. 시간에 따른 피스톤의 위치를 나타내는 스트로크 곡선은 다항 함수로 근사화하며, 이 곡선의 접선 기울기는 피스톤의 이동 속도가 된다. 해석 영역의 범위를 정하기 위해서 피스톤 이동에 따라서 피스톤 앞 부분의 셀 옆을 제거하여 바로 옆 셀과 합치고, 고정 전극 앞부분에서는 전극 이동에 따라 셀이 추가되는 방법을 이용하였다. 이 때 유동의 변수들 중 제거되는 피스톤 앞면의 셀의 밀도와 압력은 인접한 셀에 더하여 주고, 새로이 생성된 고정 전극 앞 부분의 셀에서의 유동 변수 값들은 바로 인접한 셀의 값을 대입하였다.

해석 결과로 얻어진 피스톤 전면의 압력 분포는 실험치와 비슷한 경향을 보이며, 해석 결과로부터 차단부 내의 압력, 속도, 밀도 분포 등을 파악할 수 있다.

* 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程(修了)

** 正 會 員 : 삼성SDI R&D 센터

*** 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 教授·工博

§ 正 會 員 : (株) 曉星重工業 研究所

接受日字 : 1999年 10月 18日

最終完了 : 2000年 3月 15日

2. FVFLIC법에 의한 오일러 방정식의 해석

차단부 내의 냉가스 유동 해석의 기초 방정식은 Navier-Stokes 방정식에서 점성항을 없앤 오일러 방정식(Euler Equation)이며, 이 식은 질량, 운동량 및 에너지 보존식을 나타낸다. 오일러 방정식을 적분형으로 표현하면 다음식과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V F dV + \int_S F U_n dS = - \int_S p V_{pm} dS \quad (1)$$

여기서 V와 S는 임의의 체적과 이 체적의 표면을 나타내며, 3차원 직교 좌표계의 경우 방정식의 각 항들은 다음과 같다.

$$F = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho E] \quad (2)$$

$$V_{pm} = \vec{V}_p \cdot \vec{n} = [0, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k}, \vec{U}] \cdot \vec{n} \quad (3)$$

이 식에서 ρ 는 밀도, p는 압력, E는 총에너지, u, v, w 는 속도 벡터 \vec{U} 의 x, y, z 성분이다. \vec{n} 은 표면에 수직인 외향 정규 법선 벡터이며, U_n 은 $\vec{U} \cdot \vec{n}$ 이다. 총에너지와 비내부 에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$E = I + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2), I = C_v T \quad (4)$$

주어진 밀도와 비내부 에너지로부터 압력을 구하기 위해서 다음과 같은 이상기체의 상태 방정식이 이용된다.

$$p = (\gamma - 1) \rho I \quad (5)$$

여기서 $\gamma = C_p/C_v$, C_p : 정압 비열, C_v : 정적 비열

임의의 6면체 검사 체적(Control Volume)에 대해, 유한 체적 이산화 원리를 적용하면, (1)은 다음과 같은 대수 방정식으로 바뀐다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} \Delta V + \sum_{i=1}^6 [F U_n \Delta S]_i \\ = - \sum_{i=1}^6 [p V_{pm} \Delta S]_i \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 ΔV 는 셀의 체적이며, ΔS_i 는 6개 면의 임의의 면적이다.

FLIC법은 두 가지 특징이 있다. 하나는 계산 영역을 다수의 차분 격자로 분할할 때에 통상의 차분법에서는 격자점에서의 상태량 F(질량, 운동량, 에너지)를 구하지만, FLIC법에서는 각 격자 사이에 있는 셀 내부의 유체가 가지고 있는 F의 평균치를 취한다.

FLIC법의 두 번째 특징은 비정상 성분을 2단계의 전진 차분으로 치환하는 것이며, 먼저 첫 번째 단계에서는 압력 정도 분포에 의해서만 운동량 보존식과 관련된 상태량 F의 중도값(intermediate values)을 계산하고, 비내부 에너지의 중도값은 다음식과 같이 비보존 에너지 방정식의 압력항에 의해서만 계산이 된다.

$$\frac{\partial \rho I}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho I \vec{U}) = -p \nabla \cdot \vec{U} \quad (7)$$

첫 번째 단계

첫 번째 단계에서는 식(6)에서 대류항을 무시하고 유동 변수의 중도값들을 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \hat{F}(k) = F^{(n)}(k) - \frac{\Delta t}{\Delta V} \sum_{i=1}^6 [p^{(n)} V_{pm}^{(n)}(k) \Delta S]_i \\ (k=1,2,3,4) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 위첨자 n은 Lagrange 좌표계에서의 시간 $n\Delta t$ 에서의 값을, 아래첨자 i는 셀의 임의의 6개 면을 나타낸다. 그리고 $V_{pm} = \vec{V}_p \cdot \vec{n} = [0, n_x, n_y, n_z, U_n]$ 이다. 여기서 n_x, n_y, n_z 는 셀 표면의 외향 정규 법선 벡터의 세 성분이며, U_n 은 법선 벡터 방향의 속도성분이다.

여기서 주의할 것은 비록 밀도는 식(8)에 포함되어 있지만 $V_{pm}(1) = 0$ 이기 때문에 이 계산 과정에서는 바뀌지 않는다는 점이다. 또한 첫 번째 과정에서 셀 표면에서의 모든 양들은 중앙 차분 기법에 의해 계산되며, 이는 셀 표면을 공유하는 두 개의 인접 셀의 값을 이용한다. 예를 들어 그림1에서 셀 표면에서의 압력은 셀 표면 i를 공유하는 두 개의 셀 a, b의 값으로부터 보간에 의해 구해지며, 여기서는 두 셀의 체적을 이용하여 다음식에 의해 보간하였다.

$$p_i = \frac{V_b p_a + V_a p_b}{V_a + V_b} \quad (9)$$

여기서 V_a, V_b 는 셀 a, b의 체적, p_a, p_b 는 셀 a, b 내부에서의 압력을 나타낸다.

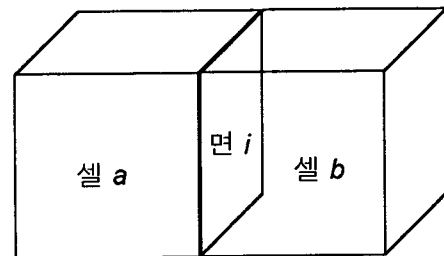


그림 1 셀 및 셀의 경계면
Fig. 1 Cells and cell interface

내부에너지의 증도값은, 식(7)에서 압력은 셀 내부에서 일정하다는 가정 하에 다음과 같은 적분형으로 바꾸어 계산한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho I dV + \int_S \rho I U_n dS = -p \int_S U_n dS \quad (10)$$

얻어진 수치 해석결과의 정확도는 일을 표현하는 항 $-p \nabla \cdot \vec{U}$ 를 어떻게 처리하느냐에 따라 많이 달라진다. 여기서 사용하는 방법은 계산 과정에서 비내부 에너지가 음이 되는 것을 막아준다.

식(10)을 검사체적에 대해서 이산화하고, 대류항을 제거하면 다음과 같은 단위 체적당의 내부 에너지의 증도값이 얻어진다.

$$(\rho I) = (\rho I)^{(n)} - \frac{\Delta t}{\Delta V} \sum_{i=1}^6 [p^{(n)} (\bar{U}_i)_{mi} \Delta S_i] \quad (11)$$

여기서 \bar{U}_i 는 초기값과 증도값의 평균값으로 다음과 같다.

$$\bar{U} = \frac{\vec{U}^{(n)} + \vec{U}}{2}, \quad (\bar{U}_i)_{mi} = \bar{U}_i \cdot \vec{n} \quad (12)$$

여기서 주의할 것은 첨자 i 는 셀 표면에서의 값을 의미하며, 첨자 i 가 없는 경우는 셀 중심에서의 값을 의미한다. 또한 표면에서의 값은 중앙 차분에 의해 인접한 두 셀의 값을 보간하여 구한다.

두 번째 단계

두 번째 단계에서는 모든 셀에서의 각 상태량들의 새로운 값들이, 질량, 운동량 및 에너지 보존법칙으로부터 첫 번째 단계에서 구한 증도값과 오로지 대류항만에 의한 영향을 가지고 계산된다. 첫 번째 단계에서 얻은 Lagrange 좌표계에 있어서의 상태값을 다음 식을 이용하여 Euler 좌표계의 상태값으로 계산한다.

$$F^{(n+1)}(k) = \hat{F}(k) - \frac{\Delta t}{\Delta V} \sum_{i=1}^6 [\delta_i \hat{F}_b(k) + (1 - \delta_i) \hat{F}_a(k)] \hat{U}_i \Delta S_i; \quad (k = 1, \dots, 5) \quad (13)$$

여기서 아래 첨자 a는 계산 셀을, b는 변 i 를 통해 인접한 이웃 셀을 의미한다.

위의 식에서 δ_i 는 차분법에서 상류차분 파라미터로 불리며, 여기서는 다음과 같은 값을 사용하였다.

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & : \hat{U}_i < 0 \\ 0 & : \hat{U}_i > 0 \end{cases} \quad (14)$$

인공 점성항

Navier-Stokes 방정식을 해석하는 경우에는 그리드 간격과 시간 스텝을 적절히 선택하면 일반적으로 인공 점성항 (artificial viscosity term)은 필요하지 않지만, 압축 비점성 유동 해석 방정식인 오일러 방정식의 경우에는 차분 방정식의 안정성을 위해서 속도가 낮은 영역에서 인공 점성항이 필요하다[5]. 인공 점성은 주로 셀의 표면에서 계산되며 그림1에서 셀 a와 b사이의 경계면 i에서의 인공점성의 크기는 다음과 같이 정의된다.

$$a_i = A [\rho_i c_i (\vec{U}_a - \vec{U}_b) \cdot \vec{n}_i] \quad , \text{ if } K U_i^2 < c_i^2 \text{ and } (\vec{U}_a - \vec{U}_b) \cdot \vec{n}_i > 0 \\ = 0 \quad , \text{ otherwise} \quad (15)$$

여기서 ρ_i : 셀 경계면에서의 밀도, c_i : 셀 경계면에서의 음속, \vec{U}_a, \vec{U}_b : 셀 a, b에서의 속도벡터, n_i : 셀 경계면에서의 외향 정규 법선 벡터

위의 식에서 K는 인위적인 점성항이 적용될 하나의 셀 접촉면에서의 마하수(Mach number)의 최대값을 결정하며, A는 점성압력항의 크기를 결정한다. 계산의 안정성을 높이기 위해서는 A는 충분히 큰 값이어야 하지만, 해의 중요한 특징들을 정확히 표현하기 위해서는 충분히 작은 값이어야 한다. 일반적으로 A는 0.5 이하의 값을 사용한다.

3. 가동부를 고려한 차단부 내 유동 해석

3.1 해석 영역

그림 2는 파퍼식 가스 차단기의 일반적인 형상을 보여준다. 형상은 직선 GH에 대해서 축대칭이며, 유동 해석시 중요한 부분은 노즐, 실린더실 및 고정 전극이며 그림에 각각의 위치 및 형상이 나타나 있다. 노즐과 고정 전극 사이에는 0.5 ~ 1[mm]의 아주 작은 갭이 있으며, 고정 전극이 노즐 부분을 빠져나가기 전에는 이 부분으로 아주 빠른 속도의 유동이 형성되기 때문에 정확한 해석을 위해서는 이 부분을 정확히 모델링 하여야 한다.

차단부를 빠져나가는 유동의 출구에 해당하는 직선 CD, DE 및 FG는 해석 영역의 경계부분이며, 이 부분에서의 유동 변수들이 내부 유동에 영향을 주지 않도록 하기 위해서 충분히 멀리 경계를 두는 것이 해석의 정확도를 높이는 데 유리하다.

3.2 압축 과정 시뮬레이션

파퍼식 가스 차단기에서는 실린더가 이동하여 고정된 피스톤과의 상대 운동에 의해 실린더실을 압축하여 유동을 형성하지만, 형상이 비교적 간단한 피스톤과 고정 전극이 이동하는 것으로 가정하는 것이 해석상 편리하다. 시간에 따른 피스톤의 위치를 나타내는 스트로크 곡선의 한 예를 그림 3

에 나타내었다. 그림에서 보듯이 스트로크 곡선의 초기 부분과 마지막 부분은 속도가 변하는 가속도 운동을 보여주며, 가운데 구간에서는 속도가 거의 일정한 등속도 운동을 나타낸다. 해석시 스트로크 곡선은 스플라인에 의해 다항 함수로 근사화하였으며, 이 곡선의 접선 기울기가 피스톤의 이동 속도가 된다.

그림 4는 가동부를 고려한 차단부 내 냉가스 해석의 전체 순서도를 나타낸다. 먼저 시간 t에서의 피스톤의 위치와 피스톤의 속도를 스트로크 곡선으로부터 구하며, 이동에 따른 해석 셀을 정의한다. 여기서 해석 셀이란 기체 영역에 위치한 셀을 의미하며, 실린더 실에서는 피스톤 이동에 따라 기체 셀 부분이 줄어들고, 고정 전극 부분에서는 전극이 이동함에 따라 기체 셀이 증가하게 된다. 즉 실린더 영역에서는 피스톤의 현재 위치가 셀의 표면을 통과하였는가를 확인하여, 만일 통과하였으면 피스톤의 경계셀을 이웃셀로 이동시킨다. 그리고 고정 전극 영역에서는 고정전극의 표면이 셀의 표면을 통과하였는가를 확인하여 고정 전극의 경계셀을 이동시킨다.

피스톤 경계셀에서의 압력은 그림 5에서와 같이 피스톤 이동에 따른 체적비를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$p^{n+1} = p^n V^n / V^{n+1} \quad (16)$$

한편 고정 전극 영역에서 새로이 기체 셀이 된 부분의 유동 변수들의 초기 값은 바로 인접한 셀들의 값을 대입한다. 이 경우 새로이 질량이 추가되기 때문에 질량 보존 법칙을 만족하지 못하지만 셀 간격을 조밀하게 하면 이러한 오차는 무시할 수 있다.

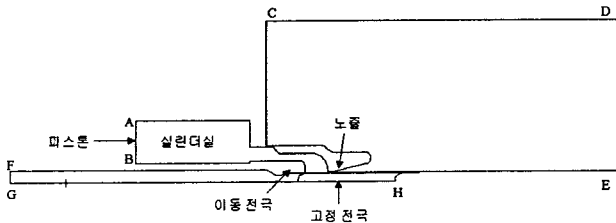


그림 2 차단부 모델 및 해석 영역 정의
Fig. 2 Circuit breaker model and analysis region

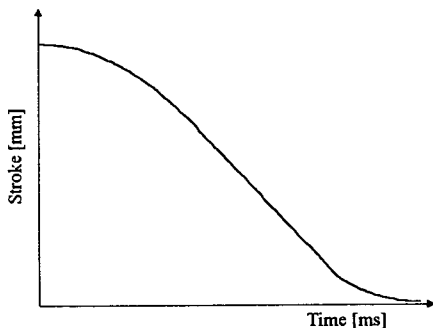


그림 3 스트로크 곡선
Fig. 3 Stroke curve

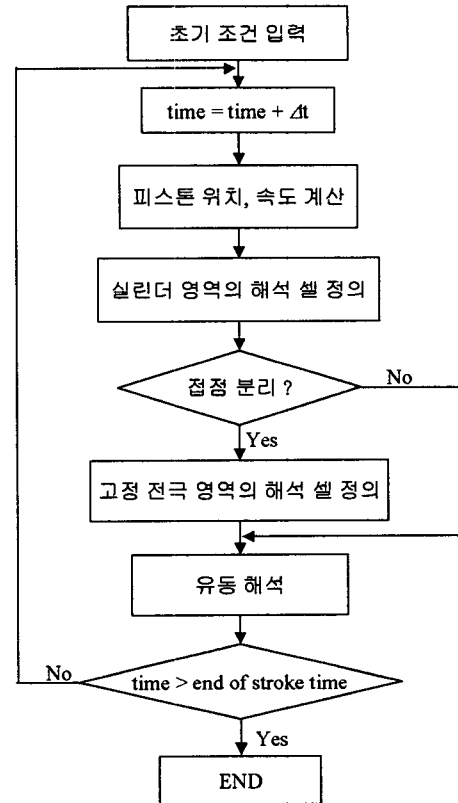


그림 4 냉가스 유동 해석 순서도
Fig. 4 Analysis procedure of cold gas flow

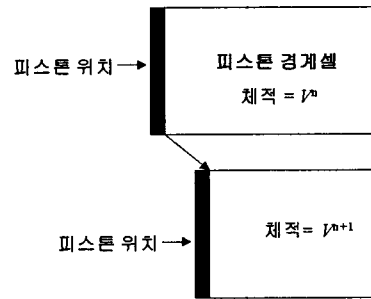


그림 5 피스톤 이동 및 압축 과정
Fig. 5 Piston movement and compression procedure

3.3 경계 조건

경계 조건은 크게 원거리 경계 조건과 영역 내 경계 조건으로 나눌 수 있다. 영역 내 경계 조건으로는 대칭 경계 조건 및 벽면 경계 조건이 있으며, 원거리 경계 조건은 유동이 초음속이나 아음속이냐에 따라 달라진다. 초음속인 경우에는 특성의 이론(characteristic theory)으로부터 유동의 변수가 상류측 조건에 의해 유일하게 결정되므로, 상류 경계에서는 유동의 모든 성분들을 주고 하류 경계에서는 어떠한 경계조건도 부여하여서는 안된다[7]. 한편 아음속의 경우 특성

곡선(characteristic curve)의 하나가 하류로부터 상류로 향하므로 상류 경계에서는 유동의 변수 중 하나만을 빼고 모두 지정하고, 하류 경계에서는 한 개만 지정할 수 있으며 주로 정압을 지정하는 경우가 많다. 여기서는 해석 영역을 충분히 멀리 잡았기 때문에 원거리 경계 조건으로는 Neumann 조건을 부여하였다[8].

그림 2에 나타난 해석 영역의 각 경계에서의 조건은 다음과 같다.

- 1) AB : 이동 경계부이며, 이동에 따른 체적비를 이용하여 압력 및 밀도가 주어진다.
- 2) CD, DE 및 FG : 해석 영역에서 충분히 떨어진 유출 경계면이며, Neumann 조건이 주어진다.
- 3) GH : 대칭 경계면 조건이 주어진다.
- 4) 그 외 경계면 : 벽면 경계 조건이 주어진다. 즉 경계면에서의 속도벡터가 경계면에 평행한 속도를 가지는 미끄럼 조건이 이용된다.

4. 시뮬레이션 및 검토

4.1 FVFLIC법의 검증

FVFLIC법의 정확도를 검증하기 위해서 그림 6과 같이 밀도 및 압력의 초기 조건이 주어진 shock tube를 해석하였다. 그림에서와 같은 초기 조건에서 가운데 부분의 막이 제거되는 순간부터 해석이 진행되며, 이 문제는 해석적 해가 존재하기 때문에 과도 상태 유동 해석 검증용으로 많이 이용되는 1차원 모델이다. 그림 7과 8은 압력 분포 및 속도 분포를 해석적 해와 비교한 것이며, 해석적 해와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있으며, 이로부터 FVFLIC법의 정확도를 검증할 수 있다.



그림 6 shock tube 모델 및 초기 조건
Fig. 6 Shock tube model and initial condition

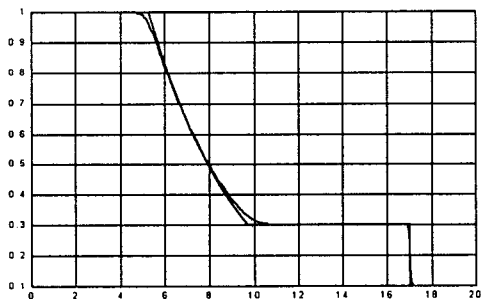


그림 7 압력 분포 비교
Fig. 7 Comparison of pressure

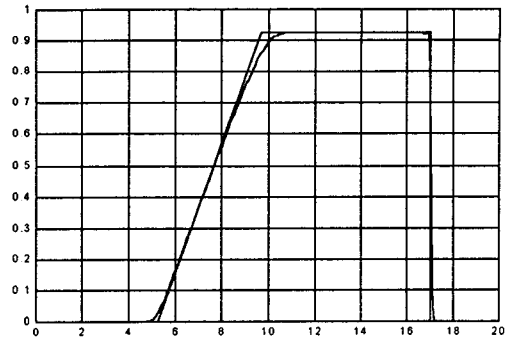


그림 8 속도 분포 비교
Fig. 8 Comparison of velocity

두 번째 모델은 2차원 유동의 경우에 대한 FVFLIC법의 정확도를 검증하기 위한 것으로 초음속 유동이 발생하는 경우의 정확도를 검증하기 위한 모델이다. 해석 모델은 그림 9와 같이 왼쪽에서 오른쪽으로 마하 2.5의 유동이 15도 경사의 wedge를 만나서 충격파가 생기는 모델이며, 원거리 유입경계 조건은 그림과 같다.

이 모델 또한 해석적 해가 존재하며 FVFLIC법에 의한 해석 결과와 해석적 해를 비교하여 표1에 나타내었다. 표1에서는 충격파 전후의 압력비, 밀도비 및 온도비와 충격파가 생성된 각도를 비교하였으며, FVFLIC법에 의한 해석 결과는 해석적 해와 매우 잘 일치하며, 이로부터 FVFLIC법이 초음속 유동의 2차원 해석시에도 정확한 해를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

Mach 2.5
Pressure 14.7 [psia]
Temperature 288 [K]



그림 9 supersonic wedge 모델
Fig. 9 Supersonic wedge model

표 1 충격파 전후의 유동장 비교
Table1 Comparison of flow field before and after shock wave

	해석적 해	시뮬레이션 결과
충격파 각도	36.9[deg]	37.1[deg]
압력비	2.47	2.48
밀도비	1.86	1.83
온도비	1.32	1.31

4.2 차단부 모델 해석

해석 모델은 170kV SF₆ 차단기 이며, 해석시의 초기 조건은 초기 SF₆ 가스 압력이 6기압, 온도는 288[K]이다. 총 스트로크 길이는 200[mm]이며, 스트로크 시간은 약 23[ms]이다. 그림 10은 전체 그리드 분할 결과 중에서 노즐 부근의 그리드를 보여주며, 노즐과 고정 전극 사이의 좁은 공간도 충분히 고려하여 그리드 분할을 하였다.

그림 11은 피스톤 앞부분에서의 압력 해석 결과를 실험치와 비교한 것이다. 실험시 압력 센서는 피스톤에 취부하기 때문에 해석시 얻어진 피스톤 전면의 셀에서의 압력 값을 실험치와 비교하였다. 초기 충전 압력은 6기압이며, 최고 압력은 실험치가 약 21기압, 해석 결과도 약 21기압의 비슷한 값을 보여주고 있다. 해석 결과는 실험치와 전반적으로 잘 일치하지만 피스톤이 정지한 후의 압력 패턴은 해석 결과와 실험치와 약간 차이가 나고 있다. 이것은 해석 영역을 실제 차단부 모델보다 넓게 잡았고 또한 점성술을 고려하지 않은 오일러 방정식을 기본 해석 방정식으로 하였기 때문에 차이가 나고 있는 것으로 분석된다. 그림 12와 13은 피스톤 이동 후의 여러 시간에서의 속도 벡터와 압력 분포를 나타낸다. 그림12에서 보듯이 고정 전극이 노즐 부를 빠져나가기 전에는 전극과 노즐 사이의 좁은 갭으로 빠른 유동이 형성되고 있는 것을 알 수 있다.

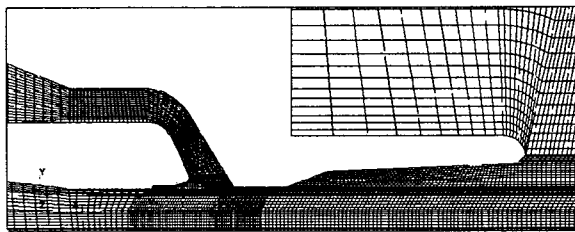


그림 10 노즐 부 그리드 형상
Fig. 10 Grids in nozzle part

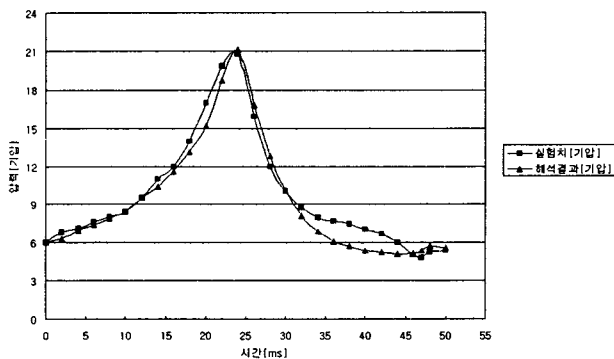
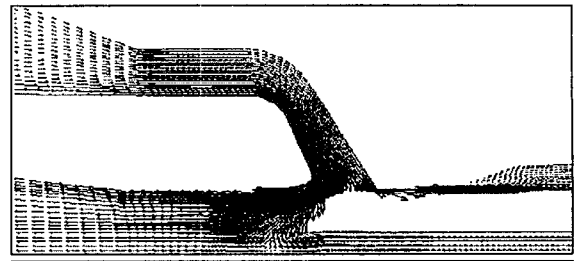
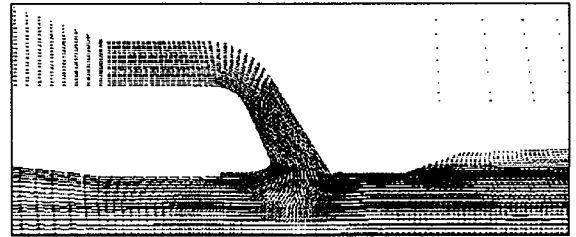


그림 11 피스톤 전면에서의 압력 비교
Fig. 11 Comparison of pressure in front of piston

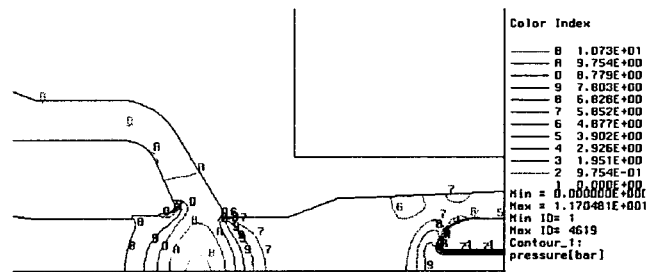


(a) time = 2[ms]

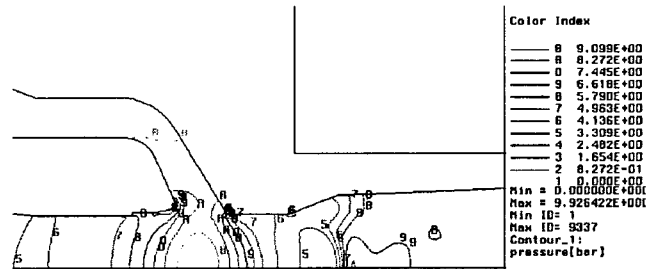


(b) time = 12[ms]

그림 12 속도 벡터
Fig. 12 Velocity vector



(a) time = 8[ms]



(b) time = 16[ms]

그림 13 압력 분포
Fig. 13 Pressure distribution

5. 결론

차단부 내의 유동 해석 시에는 초음속 유동, 복잡한 형상, 이동 경계에 따른 해석 영역 변화 등을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 사항들을 고려하여 Puffer식 차단기 내의 냉가스 유동 해석 알고리즘 및 실제 차단부 모델의 해석 결과를 나타내었다.

유동 해석의 기본 방정식인 압축 비점성 오일러 방정식을

풀기 위해서는 FVFLIC법을 이용하였다. 피스톤 및 전극 이동에 따른 해석 영역 변화를 고려하기 위해 피스톤 앞면의 셀은 스트로크에 따라 제거하고 고정 전극 앞부분에는 셀을 추가하는 방법을 이용하였다. 피스톤 앞 부분에서의 압력 해석 결과는 실험치와 비슷한 분포를 보였으며, 이러한 유동 해석은 차단부 내의 유동 특성 분석, 차단 특성 해석, 형상 설계 등에 필수적이다.

참 고 문 헌

[1] H.M. Ryan and G.R. Jones , " SF₆ SWITCHGEAR ", Peter Peregrinus Ltd., 1989.
 [2] Jean-Yves Trepanier, Marcelo Reggio and Ricardo Camarero , " LTE Computation of Axisymmetric Arc-Flow Interaction in Circuit-Breakers ", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 19 , No. 4, pp.580-589, 1991.
 [3] J.Y. Trepanier , X.D. Zhang , H.Pellegrin and R.Camarero , " Application of Computational Fluid Dynamics Tools to Circuit-Breaker Flow Analysis " , IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 10 , No.2 , pp. 817-823, 1995.
 [4] Xiao-Bin Li, Qi-Ping Wang, Yi-Bin Li and Yong Yang , " Numerical Analysis of Flow Field and the Dynamic Properties of Arc inthe Interrupting Chamber of an SF₆ Puffer Ciurcuit Breaker " , IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 25 No.5 , pp. 982-985, 1997.
 [5] Y. Zhao and D.E. Winterbone, " The Finite Volume FLIC Method and its Stability Analysis ", Int. J. Mech. Sci., Vol. 37, No. 11, pp 1147 - 1160, 1995.
 [6] 김유진 외 3인, " FLIC법을 이용한 차단기 내부의 유동 해석", 제1회 초고압 전력기기 심포지움 논문집, pp.155-155, 1998.
 [7] 신병록, 장근식, 조강래 , " 전산유체역학 ", 대영사, 1995.
 [8] K.A. Hoffmann and S.T. Chiang , " Computational Fluid Dynamics For Engineers ", Engineering Education System, 1993.

저 자 소 개



김 홍 규 (金 烘 榑)

1969년 출생. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사).1997년 서울대 공대 전기공학부 대학원 졸업(석사). 현재 서울대 공대 전기공학부 대학원 박사과정
 Tel : 02-880-7262

E-mail : khk@eesri-10.snu.ac.kr



신 승 록 (辛 承 錄)

1975년생. 1994년 서울대 전기공학부 입학. 1998년 서울대 전기공학부 졸업. 1998년 동대학원 전기공학부 입학. 2000년 동대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 삼성 SDI R&D 센터 근무
 Tel : 02-880-7262

E-mail : ssrl@snu.ac.kr



정 현 교 (鄭 炫 敎)

1955년생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년-1989년 뉴욕 Polytechnic Univ. 객원 교수. 1984년-1993년 강원대 전기공학과 부교수. 현재 서울대 전기공학부 교수

Tel : 02-880-7242

E-mail : hkjung@snu.ac.kr



김 두 성 (金 斗 星)

1974년 4월 20일생. 1997년 고려대 기계공학과 졸업. 1999년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1999년 ~ 현재 주식회사 효성 중공업 연구소 전력팀 차단기파트 연구원

Tel : 0551-268-9920

E-mail : dsk99@hyosung.co.kr



권 기 영 (權 奇 永)

1965년 11월 14일생. 1989년 서울대 공과대학 기계설계학과 졸업. 1993년 ~ 1995년 日立 國分工場 技術研修. 1989년 2월 ~ 현재 주식회사 효성 중공업 연구소 전력팀 차단기 파트 책임연구원

Tel : 0551-268-9920

E-mail : kykweon@hyosung.co.kr