

초고압 가스차단기 내부의 압축성 유동장 해석

이종철* · 오일성* · 김윤제**

Analysis of Compressible Flow Fields in a High Voltage Gas Circuit Breaker

J. C. Lee*, I. S. Oh*, Y. J. Kim**

Key Words : Gas Circuit Breaker(가스차단기), Supersonic Flow(초음속 유동), Choking(초킹), Moving Boundary Condition(이동경계조건), Mach Number(마하수)

Abstract

This paper presents the computational method for analyzing the compressible flow fields in a high voltage gas circuit breaker. There are many difficult problems in analyzing the gas flow in GCB due to complex geometry, moving boundary, shock wave and so on. In particular, the distortion problem of the grid due to the movement of moving parts can be worked out by the fixed grid technique. Numerical simulations are based on a fully implicit finite volume method of the compressible Reynolds-averaged Navier-Stokes equations to obtain the pressure, density, and velocity through the entire interruption process. 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.

1. 서론

현재 초고압급(high voltage) 가스 차단기(Gas Circuit Breaker, GCB)에 널리 이용되고 있는 파퍼(puffer)식 가스 차단기는 실린더 내 SF₆ 가스의 압축에 의해 증가된 압력을 이용하여, 전류차단 시 절연파괴에 의해 발생하는 아크전류를 소호(quenching)시키는 원리로 작동된다[1]. 파퍼식 가스차단기의 성능에 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중의 하나가 노즐의 기하학적 형상에 의해 특성되는 소호부 내의 충격파(shock wave)를 포함한 유동특성이다. 따라서 소호부의 설계에는 많은 경험과 초음속 유동[2]이 발생하는 노즐 부근의 압축성 유동장에 대한 포괄적인 이해가 요구된다. 차단특성에 직접적인 영향을 미치는 것은 소호부 내의 밀도 및 압력분포인데, 소호부 내에서 일어나는 아크 소호 메커니즘(mechanism)은 아크 자체와 충격파, 비정상성, 3차원성 등 가스유동의

상호작용에 의해 매우 복잡하기 때문에 실험적으로 조사하는 것이 용이하지 않다. 최근 들어 수치 기법, 격자생성기법, 난류모델, 경계조건 적용, 전처리 및 후처리 기법, 그리고 컴퓨터 기술의 발달로 인하여 여러 분야의 설계에 있어 유용한 도구로 자리잡은 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)[3]은 시대의 흐름에 맞추어 전기, 전자기기 분야의 응용에서도 활발히 진행 중에 있다. 특히 전력기기 분야에서의 유동해석[4]은 가스차단기의 설계, 성능개선 및 검증에 위해서 설계해석과 더불어 매우 중요하다. 이를 위해선 차단과정을 원활히 모사할 수 있는 수치적 해석이 필요한데, 차단부 내에는 전극(electrode)의 상대 운동이 존재할 뿐만 아니라, 유동의 속도가 아음속(subsonic)에서 초음속(supersonic)에 걸쳐 분포하기 때문에 충격파(shock wave) 전후의 흐름을 안정하게 해석할 수 있는 프로그램 및 해석기법의 개발이 필수적이다.

본 연구에서는 압축성 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 이용하여, 파퍼식 가스차단기 내부의 아크를 고려하지 않는 냉가스 유동 특성해석을 수행하였다. 냉가스 유동해석은 소전류 차단 시에 아크

* LG 산전 전력연구소

** 성균관대학교 기계공학부

에 의한 영향을 무시할 수 있는 경우에 이용되며, 해석결과로 얻어진 밀도, 압력과 전계해석으로 구하여진 전계강도를 이용하여 내전압 특성을 계산하는데 이용된다. 또한 이동경계조건(moving boundary condition)[5]이 포함되어 있는 차단기의 개극동작 등 차단 전과정을 모의하고, 동시에 유동공간에서의 유동을 효과적으로 계산하기 위하여 고정계산격자를 도입함으로써 계산격자의 찌그러짐 문제를 해결하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig. 1 은 파퍼형 가스차단기의 차단원리를 간략히 설명하고 있다. 전력계통에 고장이 발생하면, 고장전류에 의해 여자된 트립 코일은 조작기의 스위치를 동작시키고, 조작기는 조작로드를 통해 가동부를 오른쪽으로 이동시킨다(Fig. 1 참조). 가동부가 이동함에 따라 파퍼 실린더 내의 SF₆ 가스는 피스톤에 의해 압축되고, 아크접점은 분리되며, 분리된 아크접점 사이에는 아크가 발생하게 된다. 파퍼 실린더에서 압축된 가스는 노즐을 통해 아크로 분사되어 아크를 소호하게 되고, 아크가 소호된 직후 접점 사이에는 과도회복전압(Transient Recovery Voltage)이 인가되며, 이 전압에 견디기 위해서는 소호부에 남아 있는 열가스를 신속히 배출시키고 냉각시켜 절연성을 회복해야 한다. 이러한 과정이 재점호(restrike)없이 수행될 경우, 차단기는 고장전류를 차단하게 된다. 수치해석 시에는 격자생성 등의 문제로 인하여 실제적인 작동원리와는 반대로 Fig. 2 에 도시한 것처럼 고정접점과 피스톤이 왼쪽 방향으로 이동을 하여 파퍼 실린더 내 SF₆ 가스를 압축하는 것으로 모델링하였다.

2.2 지배방정식 및 수치해석기법

실제 차단기 소호부 내부유동은 높은 압력 하에서 짧은 시간 내에 노즐과 이동접점이 움직이기 때문에 밀도, 압력, 속도의 변화가 매우 크게 일어나며, 마하수가 1 보다 큰 초음속 유동을 동반한다. 이러한 복잡한 압축성 난류유동을 해석하기 위한 지배방정식은 비정상(unsteady), 압축성(compressible) 유동문제에 대한 식이며, 소호부는 축대칭 구조로 되어 있으므로 2차원 축대칭 해석이 가능하다. 계산에 사용된 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 그리고 난류변수 κ 와 ϵ 에 대한 방정식은 일반적인 보존형 Navier-Stokes 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

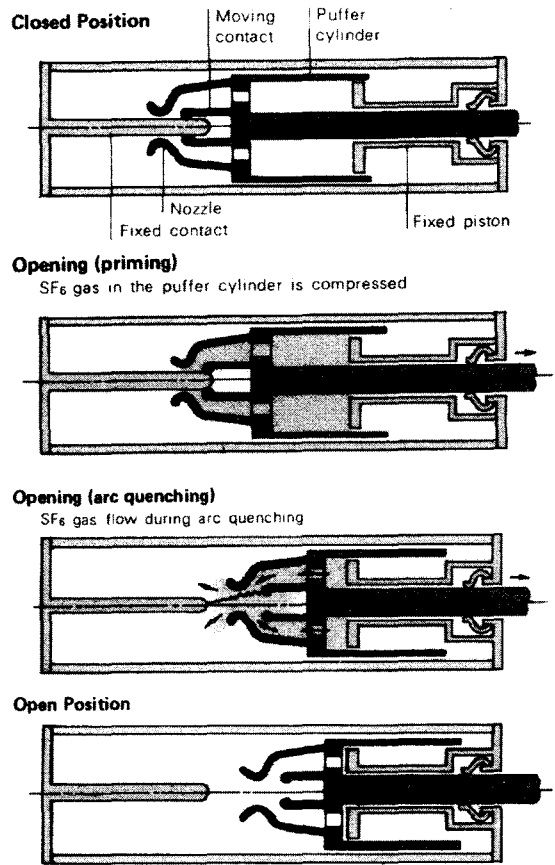


Fig. 1 Operation mechanism of a puffer-type GCB (Fuji Electric, 1998)

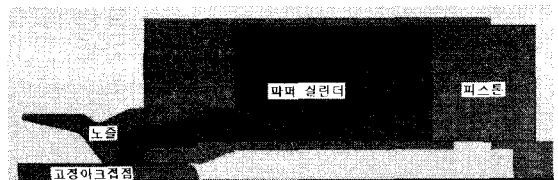


Fig. 2 Schematic diagram for a puffer-type circuit breaker

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{v}) - \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) = S_\phi \quad (1)$$

여기서 Γ_ϕ 는 변수 ϕ 에 대한 유효확산계수이며, S_ϕ 는 생성항을 나타내고 있다. 각 유동변수에 따른 유효확산계수와 생성항은 Table 1 에 요약하였다.

Table 1 Flow variable, effective coefficients and source terms for the governing equations

Equation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
continuity	1	0	0
x-momentum	u	$\mu_t + \mu_r$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \text{viscous terms}$
y-momentum	v	$\mu_t + \mu_r$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \text{viscous terms}$
energy	h	$(k_t + k_r)/c_p$	$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \text{viscous dissipation}$
k	k	$\mu_t + \frac{\mu_r}{\sigma_k}$	$\rho(P_k - \epsilon)$
ϵ	ϵ	$\mu_t + \frac{\mu_r}{\sigma_\epsilon}$	$\rho \frac{\epsilon}{k} (c_{1\mu} P_k - c_{2\mu} \epsilon)$

위 식에서 생성항 P_k 는 식(2)와 같다.

$$P_k = \rho \nu_k \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (2)$$

여기서 동점성계수 ν_t 와, κ , ϵ 에 대한 수송방정식에 나오는 상수들은 각각 다음과 같다.

$$\nu_t = c_{\mu} k^2 / \epsilon, \quad c_{\mu} = 0.09, \quad c_{1\epsilon} = 1.44, \quad c_{2\epsilon} = 1.92, \\ \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

위의 지배방정식을 이산화하기 위하여 수학적으로 유도하기가 간편하고, 보존법칙을 만족시키며, 수렴성이 좋아 유체 유동장 해석에 일반적으로 많이 이용되는 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 사용하였다. 대류항의 이산화기법으로 풍상차분도식(Upwind Differencing Scheme, UDS)을 사용하였다[6]. 난류모델은 점성저층 영역의 많은 격자수를 피하고 벽 근처 지역을 연결시켜주기 위하여 벽함수(wall-function)를 사용하는 표준 k- ϵ 모델을 사용하였다. 이를 위해서는 첫번째 격자점의 위치는 무차원거리 $y^+ (= yu_\tau / \nu)$ 가 30~300의 영역에 존재해야 한다. 전체계산 과정을 정리하면 다음과 같다.

- ① 개극속도 및 스트로크 계산 ($\Delta s = s - s_0$)
- ② 가동부 이동 및 셀 특성변환
- ③ 엔탈피(h) 계산
- ④ 온도(T) 계산
- ⑤ 주어진 온도와 압력에서 밀도(ρ) 계산

- ⑥ 압축성(= $d\rho/dp$) 계산
- ⑦ 속도 및 압력 계산
- ⑧ 수렴할 때까지 반복

2.3 경계조건과 격자계 생성

차단기의 정격 전압 및 정격 전류에 따라서 차단부의 형상, 초기 충전 압력 및 스트로크 곡선 등이 약간씩 다르며, 해석 시에는 이들을 모두 고려하여 해석을 진행한다. 유동해석은 작동유체인 SF₆ 가스 온도범위를 이상기체로 간주하여 이상기체 상태방정식을 적용하였으며, 이 때에 사용된 가스 물성치는 기준온도 288 K 에서 정적비열(C_v) 583.5 J/kg·K, 정압비열(C_p) 640.4 J/kg·K, 기체상수(R) 56.95 J/kg·K, 비열비(γ) 1.09, 음속(c) 134.2 m/s 이다[7]. 초기조건은 상온 하에서 정지해 있으며, 스트로크 곡선을 따라 가동부(피스톤과 고정아크접점)를 이동시켜 계산을 수행하였다. 총 스트로크 길이에 대한 시간구간은 490 회로 나누었으며, 각각의 시간구간마다 100 회씩 반복하여 총 50,000 회의 계산을 수행하였다.

피스톤의 압축으로 인하여 발생하는 유동은 전극이 분리됨에 따라 노즐을 통하여 출구로 빠져나가게 된다. 출구에는 압력조건과 종속변수의 구배가 0 인 조건(Neumann condition)을 사용하였다. 벽경계면에서의 속도성분은 모두 점착조건(no-slip condition)을 사용하였다.

가동부의 이동에 따라 계산격자가 찌그러지는 문제점을 해결하기 위해 Fig. 3 과 같이 시간에 대해서 고정된 계산격자 안에서 가동부의 교체영역이 움직이는 기법을 사용하였다. 가동부가 이동함에 따라 시간 t 에서 교체영역이었던 부분은 시간 t+ Δt 에서 기체영역으로 바뀌고, 반면에 기체영역이었던 부분은 교체영역으로 셀의 특성이 바뀌게 된다.

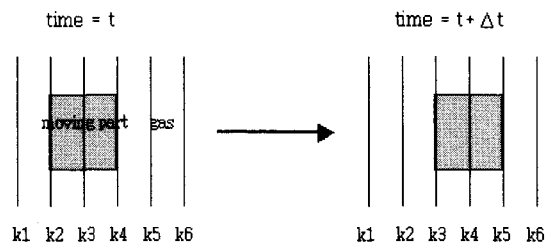


Fig. 3 Fixed grid and movement simulation of moving part

따라서 기존의 격자가 각각 삭제되거나 첨가되는 방법에서 발생하는 보간기법에서의 문제점이 감소되었고, 초음속 유동장을 보다 정확하게 계산할 수 있도록 충격파가 발생하는 영역에 조밀한 격자를 생성할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

차단부 모델에 대한 수치해석을 수행하여 피스톤 전면과 고정전극 선단에서의 압력변화를 Figs. 4 와 5 에 백분율비로 실험결과와 비교하였다. 피스톤 전면에서의 압력(Fig. 4 참조)은 차단성능에 큰 영향을 주며, 필요한 차단력을 얻기 위해서는 충분한 압력상승이 확보되어야 한다. 그림에서 보듯이 스트로크 시작 직후에는 압력증가가 뚜렷하지 않으나, 약 50 스텝 이후에 압력이 증가하기 시작하고 있음을 볼 수 있다. 그리고 전극이 완전히 노즐목(throat)을 빠져 나감에도 불구하고 파파실린더 내부의 압력상승이 꾸준히 이루어지는 것은 양쪽 노즐 부분에서 초크유동이 발생하기 때문이다. 초킹(choking)이란 노즐 목 부분에서 음속점이 발생함으로써, 노즐목 이전의 유동 속도가 마하수 1 이상 증가하지 못하기 때문에, 노즐의 개방과 같은 배압(back pressure)의 변화와 관계없이 빠져나가는 질량 유량이 일정한 현상을 말한다. 이러한 충격파영향은 최대압력상승 스트로크가 거의 끝나는 지점까지 지속되다가, 전극과 노즐 목 사이에 충분한 공간이 확보되고 피스톤의 이동 속도가 감소하는 시간부터 압력은 다시 초기 충전압력으로 회복하게 된다.

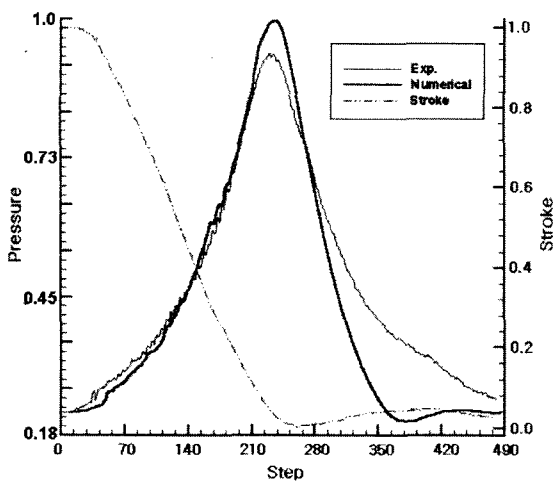


Fig. 4 Comparison of pressure in front of piston

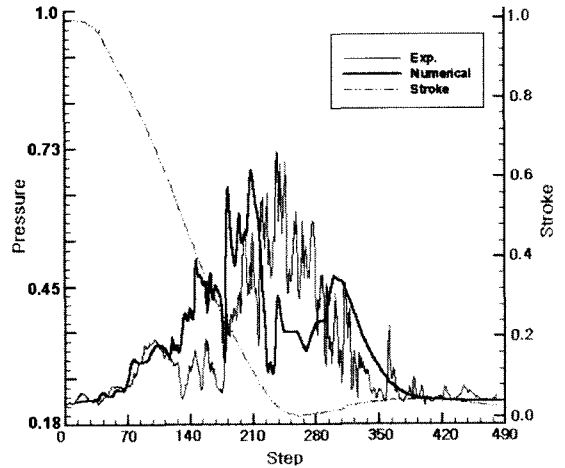


Fig. 5 Comparison of pressure in the center of stationary contact

차단부를 구성하고 있는 부분 중에서 고정 아크 점점 부근은 극간 절연 회복 특성이 가장 취약하기 때문에, 이 부분에 대한 정확한 유동해석이 이루어져야 한다. 하지만 이 부분은 이동경계부분이며, 노즐목 부근에서 형성된 충격파의 영향에 의해 압력 및 밀도변화가 심하기 때문에 정확한 해석결과를 얻기 어렵다. 본 연구의 고정전극 선단 부근의 결과(Fig. 5 참조)를 살펴봐도 정확한 과도특성을 예측하고 있지 못하고 있다. 이는 노즐목을 지나 생성되는 초음속 유동장은 고정전극에 부딪치면서 운동에너지가 감소함으로 말미암아 생기는 현상이고, 이로 인해 시간에 따라 압력변화가 심하게 변하게 된다. 즉 고정전극 부분에서의 압력상승효과는 초음속 유동장이 고정전극 근처에서 어떠한 변화를 일으키느냐가 관건인데, 이러한 효과를 적절히 해석하지 못한 것으로 나타났다.

Fig. 6 은 시간에 따른 마하수 분포를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 피스톤과 실린더의 상대운동에 따른 압축된 가스에 의해 유동이 형성되며, 실린더에서 나온 유동이 좌측 출구 및 우측 노즐로 배출되면서 양측의 노즐목에서 최대속도가 200m/s 이상이 되는 초음속 유동이 가속되고 있다. 노즐목의 하류단 부근에서 형성된 충격파로부터 목에서 초킹유동이 발생함을 알 수 있으며, 발생한 충격파의 형태는 중심축에서 수직충격파의 형태이지만, 벽 근처에서는 경사충격파의 형태로, 내부 유동에서 자주 관찰되는 λ 형 충격파[8] 형태를 나타내고 있다.

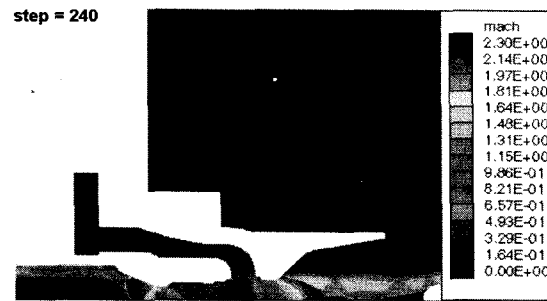
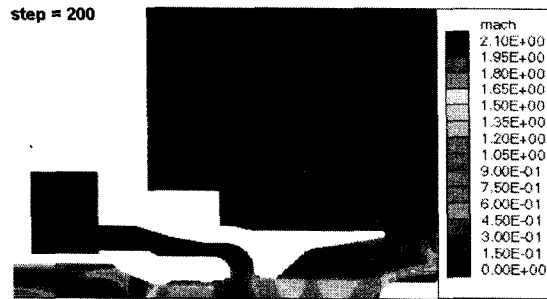
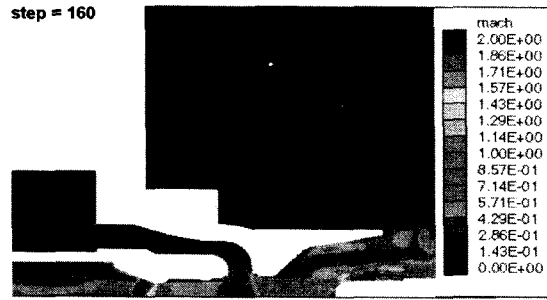
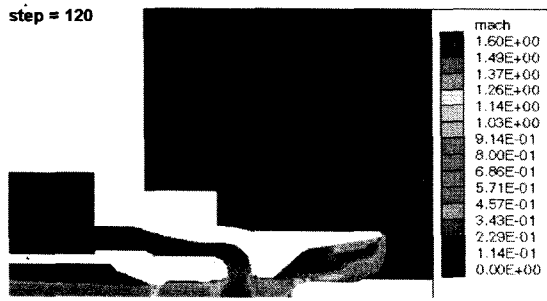
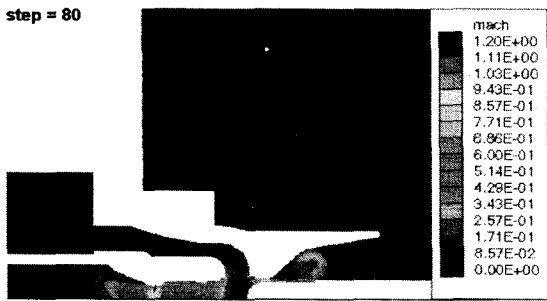


Fig. 6 Mach number distribution at each time step

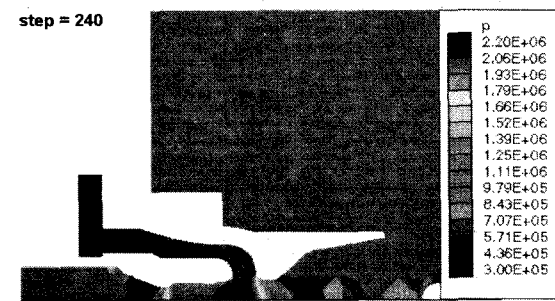
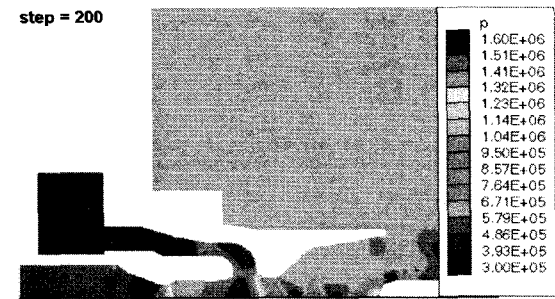
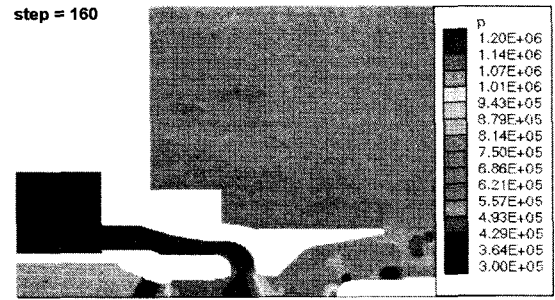
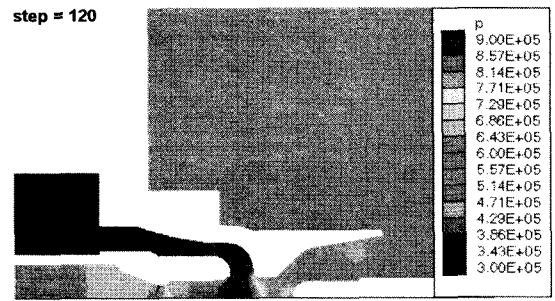
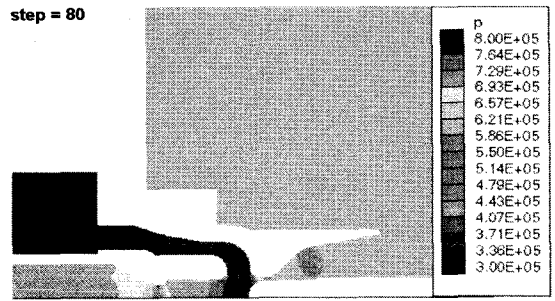


Fig. 7 Pressure distribution at each time step

Fig. 7 은 시간에 따른 압력 분포를 나타내고 있다. 실린더 내의 압력은 계속 상승하고 있으며, 압축된 가스가 왼쪽에서 오른쪽 노즐방향으로 흘러가고 있는 현상을 잘 나타내고 있다. 충격파가 발생한 위치에 따라서 실린더 내의 최대압력 상승치 및 압력상승 시간이 달라지기 때문에, 유동해석으로부터 얻어진 결과를 이용하여 효과적인 차단특성을 나타낼 수 있는 노즐의 직경, 노즐목의 길이, 노즐 확대각 등 노즐의 기하학적 설계에 반영할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 압축성 축대칭 Navier-Stokes 방정식을 이용하여, 파괴식 가스차단기 내부의 아크를 고려하지 않는 냉가스 유동 특성해석을 수행하였고, 실린더 내의 압력 및 고정아크점점 선단에서의 압력을 실험결과와 비교하였다. 실린더 내의 최대압력 상승치 및 최대압력상승 시간은 실험결과와 매우 잘 일치하였으며, 고정아크점점에서의 압력도 비슷한 경향을 보였다. 따라서 본 연구에 의한 유동해석 결과를 이용하여 초고압 차단기 설계인자에서 간과해서는 안될 중요한 설계요소인 노즐의 기하학적 형상설계 등에 반영할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 초고압 차단기 내부유동은 충격파, 비정상성, 3차원성 등 매우 복잡한 양상을 나타내기 때문에, 이를 적절히 모사하기 위한 압축성 유동해석 기법 및 난류모델의 개발 등이 요구된다. 또한 실제 대전류 차단특성을 평가하기 위하여 아크 및 전자력, 그리고 복사열전달을 고려한 연구가 계속 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Flurschein, C. H., 1982, "Power circuit breaker theory and design", IEE Power Eng. Series 1.
- (2) 노오현, 1997, "최신 압축성 유체역학", 회중당.
- (3) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington, D. C.
- (4) 이종철, 이방욱, 오일성, 2001, "PHOENICS 를 이용한 자력팽창 소호부 내 아크 유동해석", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회, pp. 44-46.
- (5) Wrobel, L. C. and Brebbia, C. A., 1993, "Computational Methods for Free and Moving Boundary Problems in Heat and Fluid Flow", Elsevier Applied Science, London New York.
- (6) Ferziger, Joel H. and Peric Milovan, 1996, "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer.

- (7) 김홍규, 신승록, 정현교, 김두성, 권기영, 2000, "Puffer 식 차단기 내의 냉가스 유동 해석", 전기학회논문지, 49B 권, 4 호, pp. 233-239.
- (8) 최보규, 구병수, 김희동, 김덕출, 2001, "주기 펄프형 아음속/음속 이젝터유동에 관한 수치해석적 연구", 대한기계학회논문집 B 권, 제 25 권, 제 2 호, pp. 269-276.