

초고압 가스차단부의 냉가스 유동해석

An Analysis of Cold Gas Flow-Field for UHV Class Interrupters

宋基東* · 朴敬燁** · 宋元杓***

(Ki-Dong Song · Kyong-Yop Park · Won-Pyo Song)

Abstract - This paper presents a method of cold gas flow-field analysis within puffer type GCB(Gas Circuit Breaker). Using this method, the entire interruption process including opening operation of GCB can be simulated successfully. In particular, the distortion problem of the grid due to the movement of moving parts can be dealt with by the fixed grid technique. The gas parameters such as temperature, pressure, density, velocity through the entire interruption process can be calculated and visualized. It was confirmed that the time variation of pressure which was calculated from the application of the method to a model GCB agreed with the experimental one. Therefore it is possible to evaluate the small current interruption capability analytically and to design the interrupter which has excellent interruption capability using the proposed method. It is expected that the proposed method can reduce the time and cost for development of GCB very much. It also will be possible to develop the hot-gas flow-field analysis program by combining the cold-gas flow field program with the arc model and to evaluate the large current interruption capability.

Key Words : GCB(Gas Circuit Breaker), 소전류 차단성능, 냉가스 및 열가스의 거동, 개극동작, 가동부 노출 및 접점

1. 서 론

차단기(circuit breaker)는 전력계통에 고장이 발생할 경우, 고장전류를 자동적으로 차단하여 계통과 다른 전력기기를 보호하는 역할을 한다.

그림 1에 초고압 파퍼형 가스차단기(UHV class puffer-type gas circuit breaker)의 차단원리를 간략히 설명하고 있다. 전력계통에 고장이 발생하면, 고장전류에 의해 여자된 트립(trip) 코일은 조작기의 스위치를 동작시키고, 조작기는 조작로드를 통해 그림 1의 빗금친 가동부를 왼쪽으로 이동시킨다. 가동부가 이동함에 따라 파퍼 실린더(puffer cylinder)내의 SF₆가스는 피스톤에 의해 압축되고, 아크접점은 분리되며, 분리된 아크접점 사이에는 아크가 발생하게 된다. 파퍼 실린더에서 압축된 가스는 노즐(nozzle)을 통해 아크로 분사되어 아크를 소호하게 되고, 아크가 소호된 직후 두 접점사이에는 과도회복전압(TRV: transient recovery voltage)이 인가되며, 이 전압에 견디기 위해서는 소호부(노즐과 가동 및 고정아크접점 부위)에 남아 있는 열가스를 신속히 배출시키고 냉각시켜 절연성을 회복해야 한다. 이러한 과정이 재점화(reignition)없이 수행될 경우, 비로소 차단기는 고장전류를 차단하게 된다.

따라서, 가스차단기의 차단성능을 사전에 검증하기 위해서는 차단기의 개극동작과 함께 차단부내에서의 유동의 흐름을 파악하여야 한다. 본 논문에서는 SF₆ 가스차단기의 소전류 차단성능을 평가하기 위해 개발된 냉가스 유동해석기법에 대해서 기술한다. 개발된 해석기법으로는 차단기의 개극동작을 포함한 차단의 전 과정이 모의 가능하며, 특히 가동부의 이동에도 불구하고 고정계산격자를 도입함으로써 계산격자의 찌그러짐 문제를 해결하였다. 따라서, 차단의 전과정에 걸쳐 차단부내의 가스온도, 압력, 밀도, 유속 등의 분포를 구하여 이것들을 가시화할 수 있게 되었다. 또한, 개발된 해석기법의 타당성을 평가하기 위해 실제 차단부에 적용한 해석결과를 실험치와 비교하고 있으며, 차단기의 소전류 차단성능을 해석적으로 평가할 수 있는 기반을 제시하고 있다.

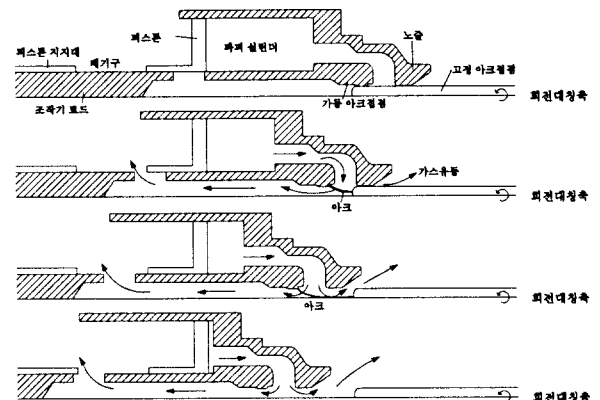


그림 1 초고압 파퍼형 가스차단기의 동작원리
Fig. 1 Operating mechanism of UHV puffer-type GCB

* 正 會 員 : 韓國電氣研究所 新電力機器그룹 先任研究員
 ** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 新電力機器그룹 그룹長
 *** 正 會 員 : (株)曉星重工業 技術研究所 高壓遮斷機部 部長
 接受日字 : 1999年 9月 20日
 最終完了 : 2000年 5月 10日

2. 차단성능 평가를 위한 유동해석과 문제점

2.1 차단성능 평가를 위한 유동해석의 분류

2.1.1 대전류 차단성능 평가를 위한 열가스 유동해석

차단부내의 유동해석은 크게 무부하시의 냉가스 유동해석과 아크가 존재하는 부하시의 열가스 유동해석으로 나누어진다. 열가스 유동해석의 결과는 열가스의 냉각, 배출 등을 고려하여 노즐형상 등 소호부의 형상을 결정하는 데 활용되며, 최종적으로 단자단락고장(BTF: bus terminal fault)과 근거리선로고장(SLF: short line fault)시의 대전류(보통 수십 kA) 차단성능을 평가하는 데 활용된다. 하지만, 열가스 유동해석의 경우 소호부내의 아크현상이 대단히 복잡하여 아크현상에 대한 물리적인 이해, 프로그램 작성을 위한 수식화 또는 아크모델의 개발 등 많은 문제점들을 갖고 있다. 또한, 그 해석기법은 외국의 각 기관에서 차단기 설계의 핵심수단으로 보호되고 있기 때문에, 해석기법을 확보하기도 어려울 뿐만 아니라 해석기법을 완성한 연구기관도 드문 실정이다[1].

2.1.2 소전류 차단성능 평가를 위한 냉가스 유동해석

대부분의 차단기는 부하전류나 고장전류와 같은 대전류를 차단할 때, 첫 전류영점에서 차단하지 못하고 접점간격이 충분히 확보된 후에야 성공적으로 아크를 소호하지만, 장거리 송전선로, 케이블, 콘덴서 뱅크 등을 개로할 때 일어날 수 있는 진상소전류와 같이 극히 작은 전류(보통 수십[A])는 접점이 개리한 뒤 곧 차단될 수 있다. 이 경우에는 극간에 충분한 이격거리가 확보되지 않은 상태에서 계통전압 최대치의 약 2배에 가까운 전압(차단후 0.5사이클이 경과한 시점에서)이 극간에 인가되어 재점화가 일어날 가능성이 증가하게 된다[2]. 재점화가 일어난 후 전류를 차단하게 되면, 이론적으로 전압이 점차 상승하여 외부에서 섬락이 일어나거나 콘덴서가 파괴되는 일이 발생한다. 따라서, 소전류 차단성능은 극간의 절연회복능력과 밀접한 관계가 있으며, 극간의 절연회복능력은 극간의 가스밀도와 전계강도에 의해 결정되는 식(1)의 섬락전압으로 평가할 수 있다[3].

$$V_{bd} = a \frac{\rho^b}{E} \quad (1)$$

여기서, a, b는 실험상수, ρ 는 가스밀도[kg/m³], E는 전계강도[pv/mm]를 나타낸다.

따라서, 극간 절연회복특성을 검토하기 위해서는 우선 개극거리별로 전계해석을 수행하여 차단부 각 부분의 전계강도를 알아야 하며, 그 다음에는 냉가스 유동해석을 수행하여 차단부 각 부분의 유동특성, 즉 밀도, 온도, 압력, 속도를 알아야만 한다. 이렇게 구한 전계강도의 변화 및 유동특성의 변화를 식(1)에 적용하면 차단부 각 부분의 절연회복특성을 계산할 수 있다.

하지만, 위와 같이 차단성능을 평가하기 위한 차단부내의 유동해석을 위해서는 다음과 같이 해결하여야 할 문제점들이 있다.

2.2 차단부내 유동해석상의 문제점

2.2.1 가동부의 이동을 모의하는 문제

자체 개발한 프로그램 또는 상용 CFD프로그램을 이용하여 차단부내의 유동해석을 하는 경우, 가장 기본적인 문제는 차단부의 이동을 모의하는 것이다. 즉, 식(1)에서 알 수 있듯이 차단기의 소전류 차단성능을 평가하기 위해서는 이동거리(stroke) 별로 각 부분의 전계강도와 밀도값이 필요하다. 따라서, 계산상의 편리함을 위해 실제와는 다르게 가동부가 움직이는 것 대신에 고정부인 피스톤과 고정아크접점이 움직인다고 가정하는 경우, 파퍼 실린더에서 피스톤의 압축과정과 고정아크접점의 이동을 모의할 수 있는 작업이 필요하다. 하지만, 현재 사용되고 있는 상용 CFD(computational fluid dynamic) 프로그램 중에서 이러한 피스톤의 이동과 고정아크접점의 이동을 동시에 모의할 수 있는 것은 거의 전무하며, 설령 이동경계 기능(module)을 가지고 있다고 하더라도, 고정아크접점의 이동을 모의하는 중에 계산격자가 심하게 뒤틀리게 되어 계산 자체가 불가능해진다.

한편, 차단부내 유동해석을 위해 프로그램을 자체 개발하는 경우에는, 형상 모델링과 계산격자를 생성하기 위한 전처리(Pre-processor)과정과 계산결과 처리를 위해 후처리(Post-processor)과정을 작성해야 함은 물론, 유동해석을 위한 해석기법(scheme)을 결정하기도 어려우며, 결정적으로 계산결과에 대한 신뢰성확보가 매우 취약하다는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 상용 CFD 프로그램의 틀을 빌려, 해를 얻는 과정을 연구자가 직접 상용 CFD에 프로그램하는 방법을 모색하였다.

2.2.2 고정아크접점 곡률의 형상화 문제

차단기의 소전류 차단성능을 평가하는 데 있어서 가장 취약한 부분은 고정아크접점 선단의 곡률(그림 2의 (b))부분이다. 왜냐하면, 이 부분에서는 스트로크가 진행됨에 따라 가스밀도가 급격히 변하고 차단부 전체에서 전계강도가 가장 크게 나타나기 때문이다. 따라서, 차단기의 소전류 차단성능을 보다 정확히 파악하기 위해서는 이 부분에 대한 형상모델링이 대단히 정확해야 하며, 이 부분에서의 계산격자는 뒤틀림(skewness)이 없어야 한다. 본 연구에서 이 문제의 해결방안에 대해서는 뒤에서 자세히 검토하고 있다.

2.2.3 아크 지배방정식을 정립하는 문제

소호부내에 아크가 존재하는 경우, 차단부내의 가스는 상온에서 최대 약25,000 K까지의 온도분포를 가지게 된다. 따라서, 이 온도범위에서의 SF₆ 가스에 대한 물리적 특성치를 확보하여야 하며, 전류 크기에 따른 주울 열(Ohmic's heating), 전도(conduction), 대류(convection), 방사(radiation)에 의한 열 전달, 난류(turbulence)를 고려한 난류모델의 결정, 충격과의 포획(shock capturing), 아크전류에 의한 전자기력(Lorentz's force) 등을 고려하는 지배방정식의 정립 즉, 아크모델의 개발이 쉽지 않은 문제이다.

2.2.4 계산의 수렴성 문제

아크가 존재하는 경우, 유동 파라미터의 불연속이 발생하여 연속방정식을 만족시키기 어려우며, 아크모델을 접목시켜

전도, 대류, 방사와 같은 열전달 과정을 동시에 해결하는 것은 용이하지 않다. 또한, 아크 지배방정식의 비선형성 때문에 계산의 수렴이 어려우며, 각각 전류영점구간과 대전류 구간에서의 시간간격(time step)과 완화계수(relaxation factor)의 조정도 문제가 될 수 있다.

2.2.5 아크모델에 실험적 요소를 고려하는 문제

차단부내 유동해석의 최종단계로, 이론적으로 전개하기 어려운 아크에 의한 아크접점의 용융(melting)과 노즐의 용삭(ablation) 등 아크모델에 경험적인 요소를 고려해야 하는 문제가 있으며, 특히 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 아크에 의한 SF₆가스의 화학적 변화까지 고려해야 하는 문제가 있다.

2.2.6 해석결과의 검증

이상과 같이 아크를 포함한 열가스 유동해석을 성공적으로 수행한다 하더라도, 해석결과를 검증하기 위한 아크 파라미터의 측정은 매우 어려운 문제이다.

본 연구는 위 문제들 중 2.2.1항과 2.2.2항의 문제를 해결하여 차단기의 소전류 차단성능을 평가할 수 있는 기반을 마련한 것으로, 2.2.1항의 문제점을 해결하기 위해 직접 작성한 프로그램을 상용 CFD프로그램 "Phoenics"에 접목시켰고, 2.2.2항의 문제점을 해결하기 위해 상용 CFD프로그램 "Rampant"를 사용하였다. 해석결과의 검증을 위해 실제 실험에 사용된 차단기는, 145kV 40kA 2000A 파퍼형 가스차단기이다.

3. 개로동작을 모의한 차단부내 냉가스 유동해석

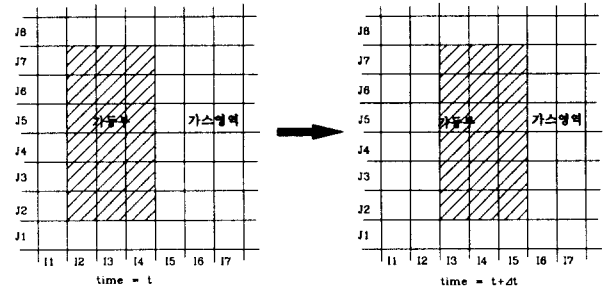
3.1 가동부의 이동모의 기법

차단부의 유동해석에 있어서 최우선적으로 고려했던 문제점은 가동부(계산상에 있어서는 실제와는 다르게 피스톤과 고정아크접점이 이동하는 것으로 모의)가 이동함에 따라 계산격자의 찌그러짐을 방지하는 해석기법을 모색하는 것이었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 2와 같이 가동부의 이동에 대해 계산격자의 크기와 위치가 변하지 않는 즉, 시간에 대해서 고정된 계산격자(fixed grid)안에서 가동부의 교체영역이 움직이는 기법을 사용하였다.

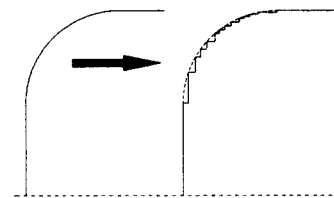
그림 2의 (a)에서 가동부가 이동함에 따라 시간 t에서 교체영역이었던 (I2, J2...7)번의 셀(cell)들은 시간 t+Δt에서 기체영역으로 바뀌고, 반면에 시간 t에서 기체영역이었던 (I5, J2...7)의 셀(cell)들은 시간 t+Δt에서 교체영역으로 셀의 특성이 바뀌게 된다. 이와 같이 Δt동안 스트로크(stroke)가 진행될 때마다 각각의 시간에서 셀들의 특성을 지정하고, 특성이 바뀐(교체영역에서 기체로 또는 기체영역에서 교체로) 셀에 있어서는 각 시간단계에서 주위 셀들의 조건을 초기조건으로 지배방정식이 적용되어 처리된다.

두 번째로 처리해야 할 문제로, 이미 2.2.2항에서 언급했듯이 소전류 차단성능 평가에 있어서 가장 중요한 고정아크접점 선단의 곡률을 적절히 형상화하는 것이었다. 가동부의 이동을 고정된 계산격자 안에서 모의할 수 있지만, 본 연구

에서 사용한 사각형 계산격자(structured grid)로는 고정아크 접점 선단의 곡률을 정확히 형상화하는 것은 불가능하다. 반면에, 삼각형 계산격자(unstructured grid)를 사용하는 경우, 고정아크접점 선단의 곡률을 보다 정확히 형상화할 수 있지만, 가동부의 이동을 모의하는 것이 거의 불가능하다. 따라서, 1단계로 그림 2의 (b)와 같이 고정아크접점 선단의 형상을 근사화하여 차단부내의 냉가스 유동해석을 수행하고, 아래의 5.3절에서 설명하는 2단계 처리를 통해 2.2.2에서 언급한 문제점을 해결할 수 있었다.



(a) 고정된 계산격자와 가동부의 이동 모의방법
(a) Fixed grid and movement simulation of moving parts



(b) 고정아크접점 선단(tip)의 곡률 근사화
(b) Approximation of tip shape in fixed arcing contact

그림 2 가동부의 이동 및 고정아크접점 곡률의 근사화
Fig. 2 Movement and approximation in moving parts

3.2 지배방정식 및 해석과정

비정상상태(unsteady state)의 유동문제에 대한 지배방정식은 다음에 나타낸 식(2) ~ (5)의 연속방정식, 운동량보존 방정식, 에너지보존 방정식, 상태방정식이 적용된다[6].

· 연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \tag{2}$$

· 운동량 보존방정식 :

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \text{ grad})\vec{u} = -\text{grad } P \tag{3}$$

· 에너지보존방정식 :

$$\rho \frac{\partial \vec{h}}{\partial t} + \vec{u} \text{ grad}(\rho h) + \text{div}(P \vec{u}) = S_{\text{source}} \tag{4}$$

· 상태방정식

$$P = (\gamma - 1)\rho C_v T \quad (5)$$

여기서, ρ : 가스밀도[kg/m³], $\vec{u} = (u_x, u_r)$ 는 속도벡터 [m/sec], h : enthalpy[J/kg], γ : 비열비(ratio of specific heat), C_v : 정적비열(specific heat at constant volume), P : 압력[atm], T : 온도 [K], S_{source} : 에너지원[W](부부하시 = 0, 부하시 = 아크에너지), t : 시간[sec]을 나타낸다.

위의 지배방정식들은 계산영역에서 SIMPLE 알고리즘[4]을 이용하여 풀어지는 데, 압력(P)을 가정해서 식(3)의 운동량 보존방정식이 만족할 때까지 속도 u_x, u_r 를 계산한다. 식(3)에서 구해진 속도 값을 식(2)의 연속방정식에 대입하여 오차가 생긴 만큼 압력(P)를 보정(pressure correction)한다. 보정된 압력 값을 다시 식(3)에 대입하여 속도 값을 구하고, 속도 값을 다시 식(2)에 대입하여 압력 값을 보정하는 과정을 반복하여 최종적으로 식(3)과 식(2)을 만족하는 속도 값을 구하게 되면 식(4)의 에너지 방정식을 푼다. 전체 계산과정은,

- 1) 개극속도 및 스트로크 계산($S-S_0=\Delta s$)
- 2) 가동부 이동 및 cell 특성변환
- 3) 엔탈피(h) 계산
- 4) 온도($T=h/C_p$, C_p : 정압비열(specific heat at constant pressure)) 계산
- 5) 주어진 온도와 압력에서 밀도(ρ)
- 6) 압축성(compressibility) $d\rho/dp$ 계산
- 7) 속도벡터 u_x, u_r 및 압력 P 계산
- 8) 수렴할 때까지 반복

으로 이루어지며, 계산의 수렴성을 개선하기 위해 완화계수(relaxation factor)를 조정하는 한편, 수렴성을 확보하기 위해 양해법(explicit scheme)을 사용하였다[9].

표 1 SF₆ 가스의 물성치

Table 1 Properties of SF₆

SF ₆ 가스압 [MPa]	온도 [K]	밀도 [kg/m ³]	정압비열 [J/kg.k]	정적비열 [J/kg.k]	가스 상수(R)	비열비 (γ)
0.1	300.00	5.86	634.00	577.12	56.88	1.098
	500.00	3.51	858.00	801.02	56.98	1.071
	1000.00	1.76	1004.00	947.18	56.82	1.059
	1500.00	1.11	2350.00	2289.94	60.06	1.026
0.4	300.00	23.40	634.00	577.02	56.98	1.098
	500.00	14.10	858.00	801.26	56.74	1.070
	1000.00	7.03	1004.00	947.10	56.90	1.060
	1500.00	4.58	1540.00	1481.78	58.22	1.039
1.0	300.00	58.50	634.00	577.90	56.90	1.098
	500.00	35.10	858.00	801.15	56.85	1.070
	1000.00	17.60	1004.00	947.18	56.82	1.059
	1500.00	11.60	1310.00	1252.83	57.18	1.046

계산에 필요한 SF₆가스의 물성치는 데이터 베이스(data base)화하여 파일로 저장되어 있으며, 표 1에 계산에 이용된 SF₆가스의 물성치를 나타내고 있다. 가동부의 이동은 실험에서 얻어진 스트로크곡선을 시간에 대해 함수화(poly-nomial interpolation)하여 구하였다. 총 개극시간 45msec를

300회의 시간구간(time step $\Delta t=1.5e-4$ sec)으로 나누었고, 각각의 시간구간마다 수렴되기까지 또는 100회의 반복계산(iteration)을 수행하여 총 30000회의 계산이 수행되었다.

그림 3은 소호부에서의 계산격자를 나타내며, 총 계산격자 수는 76,145(485×157)개로 펜티엄(Pentium)급 퍼스날 컴퓨터(CPU 400MHz)에서 약 60시간의 계산시간이 소요되었다.

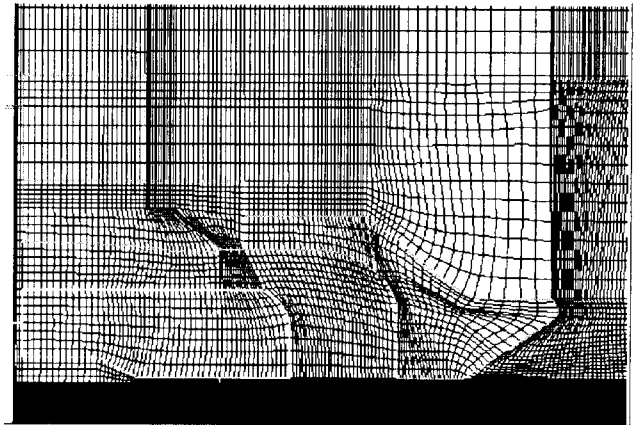


그림 3 소호부(노즐과 아크점점 영역)의 계산격자

Fig. 3 Grid of interrupter (region of nozzle and contacts)

4. 해석결과와 검증을 위한 압력측정

145kV 모델차단부의 파퍼실린더내부와 노즐상류장의 압력변화를 측정하기 위해 그림 4에 나타나 있듯이 2개의 압력센서를 취부하였으며, 센서로는 스트레인 게이지형(PWF-50B)센서를 선정하였다. 각 센서는 차압을 정밀하게 측정할 수 있는 소형의 것이며, SF₆ 가스가 5.5[bar]로 채워져 있는 탱크내에서 몰드(mold) 처리된 단자대를 통해 센서 리드선을 외부로 인출하였다.

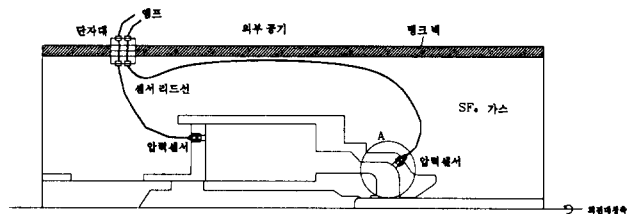


그림 4 압력센서 취부도

Fig. 4 Position of pressure sensor

그림 5는 압력측정 및 차단부의 스트로크 외에 조작기의 조작압력, 주점점의 접촉시점을 측정하기 위한 측정시스템을 나타내고 있다.

그림 6은 측정된 파퍼실린더와 노즐상류장 압력상승 및 스트로크 곡선의 오실로그램을 나타내고 있으며, 노즐상류장과 파퍼실린더 압력센서의 증폭정수(scaling factor)는 각각

서로 다르다. 또한, 본 연구에서의 차단기의 조작기는 유압(油壓)을 사용하고 있으며, 유압의 크기에 따라 개극속도가 변하며, 개극속도가 변하면 파퍼실린더의 압력상승도 동시에 변한다.

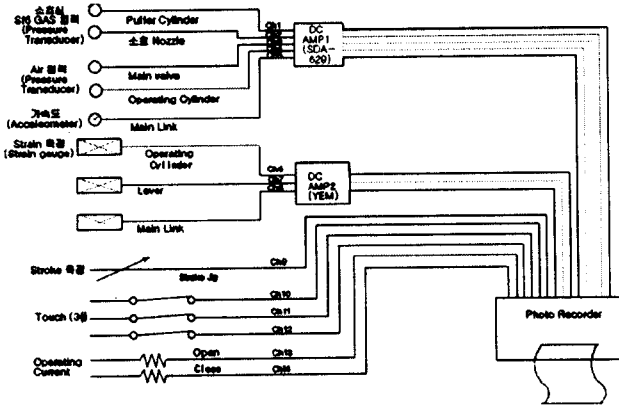


그림 5 측정시스템 구성도
Fig. 5 Measuring system

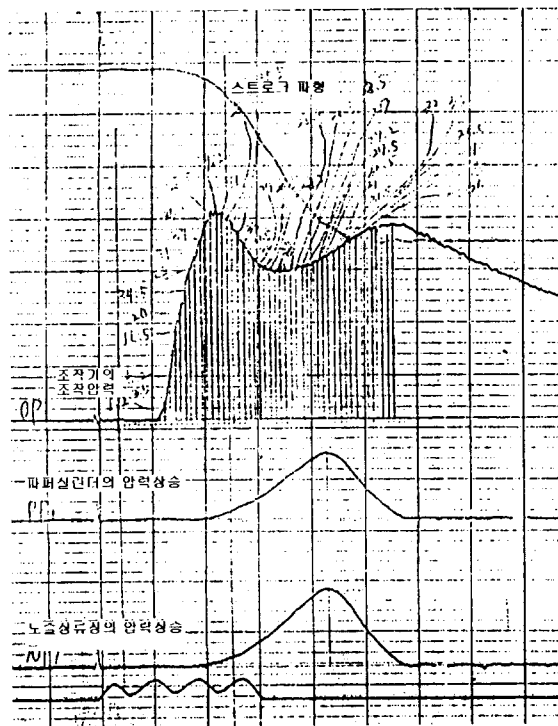


그림 6 스트로크에 따른 파퍼실린더 및 노즐상류장 압력상승의 오실로그래프
Fig. 6 Oscillogram of pressure-rise in puffer cylinder and nozzle upstream

5. 결과 및 고찰

5.1 스트로크에 따른 속도분포 및 압력분포

그림 7에 차단부의 이동을 모의하여 해석한 압력분포와

속도분포를 나타낸 것으로, step 120이후에는 가스속도가 마하 수(Mach number) 1(SF₆ 가스의 경우 127m/s)이 넘어 초음속으로 되고 있으며 노즐 하류장에 충격파(shock)가 발생함을 알 수 있다. 이와 같이, 어느 특정한 위치에서 소호부내의 유동변수를 정밀히 분석할 수 있게 되어 소호부형상설계가 가능하게 되었으며, 사전에 차단성능을 미리 예측할 수 있게 되었다. 각 그림에서 스트로크와 최대 압력상승값은 기압의 비밀차원에서 보호를 받아야 되는 수치이므로 각각의 최대값을 기준으로 백분율 비[p.u]로 나타내었다.

5.2 파퍼실린더와 노즐상류장에서의 압력상승

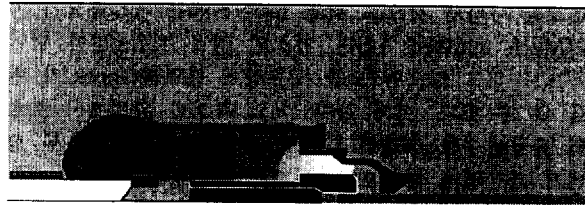
그림 8에 계산된 파퍼실린더 및 노즐상류장에서의 압력상승을 실험치와 비교하고 있으며, 각각의 값들은 파퍼실린더 실험치의 최대값을 기준으로 백분율비(percentage unit)로 나타내었다. 그림 8에서 계산된 파퍼실린더의 압력상승치는 실험치와 거의 일치하고 있으며, 스트로크에 따른 압력분포도 유사하다는 것을 알 수 있다. 하지만, 노즐상류장 압력상승에 있어서의 다소 큰 차이를 보이고 있는 데, 이것에 대해 상세히 검토해 보기로 한다.

우리가 통상 압력이라고 하는 것은 총 압력(total pressure) 또는 정체압력(stagnation pressure)을 말한다. 이 총 압력은 동적압력(dynamic pressure)과 정적압력(static pressure)의 합으로 나타난다[5]. 즉, $P_t(\text{total pressure}) = P_d(\text{dynamic pressure}) + P_s(\text{static pressure})$ 를 관계를 가지고 있고, 다음 그림 9에서처럼 유동의 방향과 센서의 취부구조를 고려할 때, 실험치에서 얻어진 압력상승은 정적압력이라는 것을 알 수 있다. 따라서, 총 압력을 나타내는 계산결과와 차이를 보이는 것은 당연하며, 정확도에 있어서는 대단히 높은 결과를 얻었다고 판단된다.

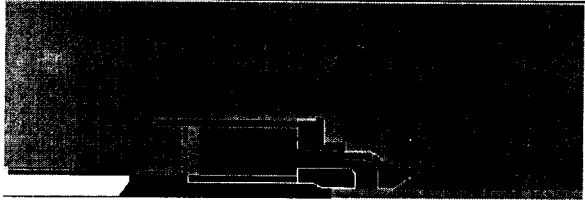
5.3 아크점점 곡률의 근사화와 소전류 차단성능 평가

차단기의 이동과 사각형격자(structured mesh) 때문에 고정아크점점 tip의 곡률을 그림 2의(b)와 같이 근사화 하였다. 하지만, 차단기의 소전류 차단성능을 평가하는 데 있어서 가장 중요하고 취약한 부분이 가동아크점점 팁의 곡률부분이다. 이 부분에서의 전계는 차단기 전체에 있어서 가장 강하게 나타나며, 유동 파라미터가 가장 급격히 변화하기 때문에 곡률부분의 미세한 형상변화에도 소전류 차단성능은 크게 달라진다[7]. 따라서, 차단기의 소전류 차단성능을 평가하기 위해서는 보다 정확한 형상모델링이 반드시 필요하며 그에 대한 개선방안이 마련되어야 했다.

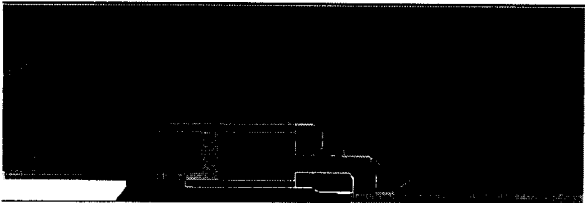
그 일환으로, 스트로크 시간에 대한 파퍼실린더의 압력상승이 실험치로 구해지면, 그림 10과 같이 피스톤에 구해진 파퍼실린더의 압력상승을 입력조건으로, 또한 형상모델링에 있어서 보다 정확한 삼각형 계산격자(unstructured mesh)를 사용하여 스트로크 시간구간(time step)에서 정상상태(steady state)로 해석하는 방안을 모색하였다. 이러한 해석결과를 검증하기 위해 고정아크 점점 팁의 압력을 측정하여[8] 계산결과와 비교하였으며 그 결과를 그림 11에 나타내고 있다.



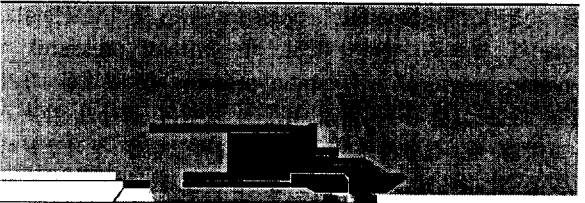
Step 10: time=1.5ms, $S \approx 0.01\text{p.u.}$, $P_{\text{max}} \approx 0.45\text{p.u.}$



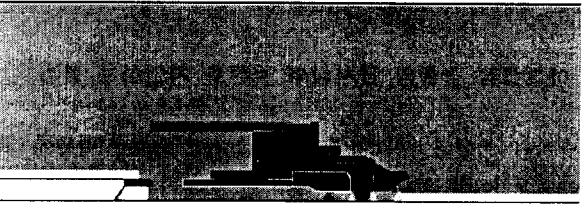
Step 50: time=7.5ms, $S \approx 0.10\text{p.u.}$, $P_{\text{max}} \approx 0.49\text{p.u.}$



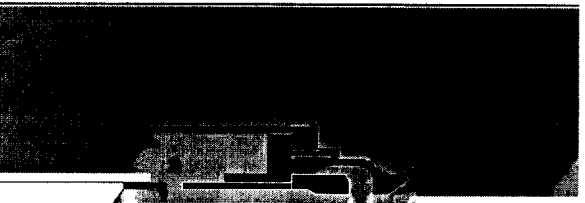
Step 100: time=15.0ms, $S \approx 0.30\text{p.u.}$, $P_{\text{max}} \approx 0.63\text{p.u.}$



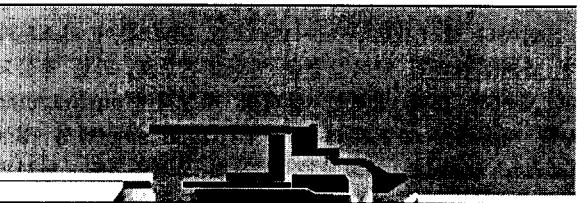
Step 130: time=19.5ms, $S \approx 0.59\text{p.u.}$, $P_{\text{max}} \approx 0.77\text{p.u.}$



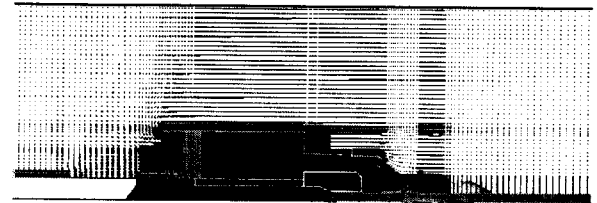
Step 170: time=25.5ms, $S \approx 0.84\text{p.u.}$, $P_{\text{max}} \approx 0.98\text{p.u.}$



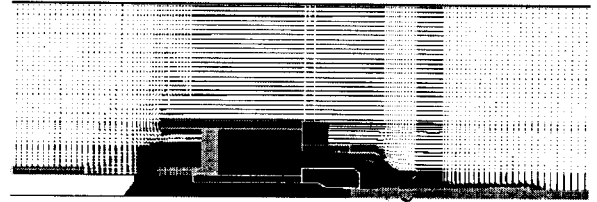
Step 210: time=31.5ms, $S \approx 0.98\text{p.u.}$, $P_{\text{max}} \approx 0.91\text{p.u.}$



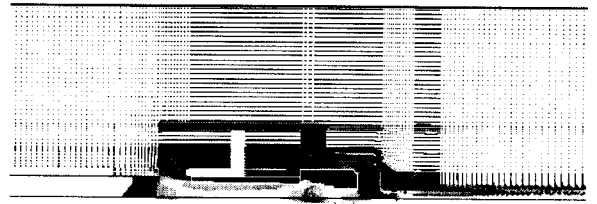
Step 250: time=37.5ms, $S \approx 1.00\text{p.u.}$, $P_{\text{max}} \approx 0.50\text{p.u.}$



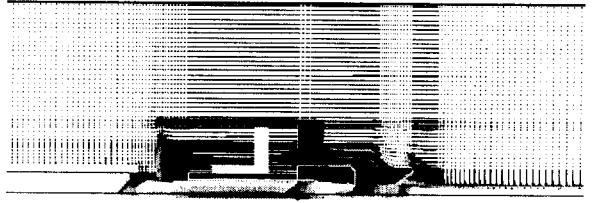
Step 30: time=4.5ms, $S \approx 0.05\text{p.u.}$, $V_{\text{max}}=29.0\text{m/s}$



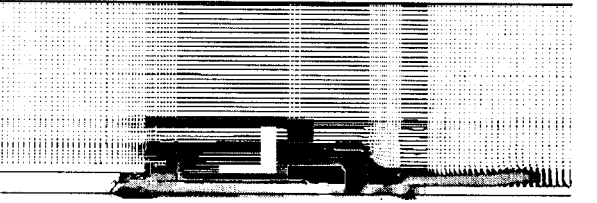
Step 80: time=12.0ms, $S \approx 0.24\text{p.u.}$, $V_{\text{max}}=76.9\text{m/s}$



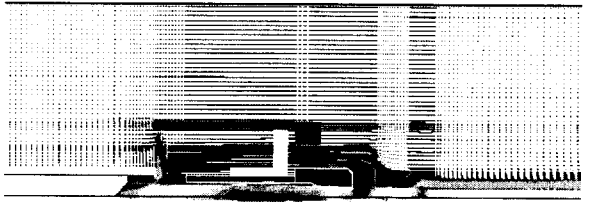
Step 120: time=18.0ms, $S \approx 0.52\text{p.u.}$, $V_{\text{max}}=120.0\text{m/s}$



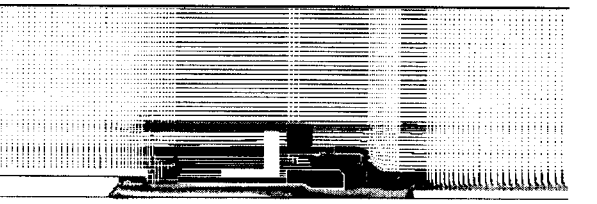
Step 160: time=24.0ms, $S \approx 0.78\text{p.u.}$, $V_{\text{max}}=184.0\text{m/s}$



Step 200: time=30.0ms, $S \approx 0.96\text{p.u.}$, $V_{\text{max}}=170.0\text{m/s}$



Step 240: time=36.0ms, $S \approx 1.00\text{p.u.}$, $V_{\text{max}}=148.0\text{m/s}$



Step 300: time=45.0ms, $S \approx 1.00\text{p.u.}$, $V_{\text{max}}=79.2\text{m/s}$

그림 7 차단부 압력분포 및 속도분포

Fig. 7 Distribution of pressure and temperature in GCB

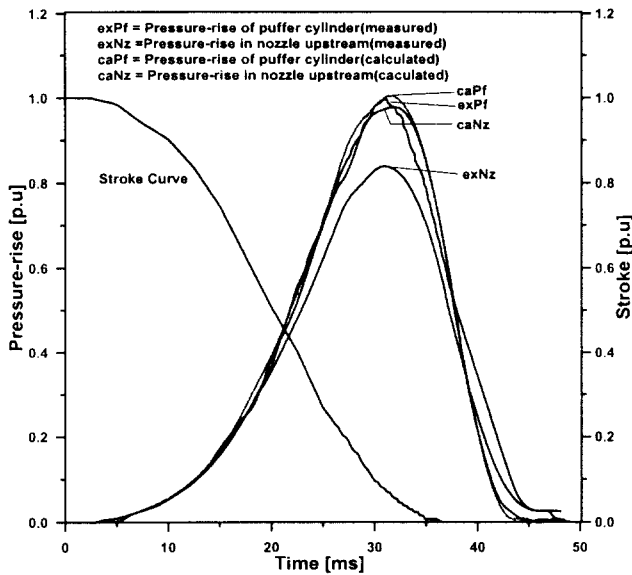


그림 8 파퍼실린더 압력상승의 실험치와 비교
Fig. 8 Comparison of pressure-rise in puffer cylinder

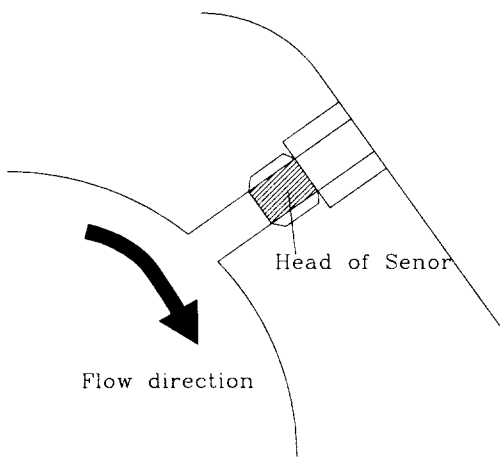


그림 9 노즐상류장에서의 유동방향과 압력센서 취부도 (그림 4의 "A"로 표시)
Fig. 9 Relation flow direction and pressure sensor in nozzle upstream (remarked "A" in Fig. 4)

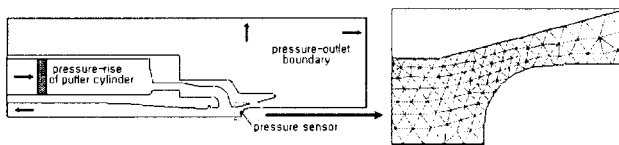


그림 10 정상상태에서의 계산조건 및 고정아크접점 선단의 계산격자
Fig. 10 Boundary conditions and grid in tip of fixed arcing contact

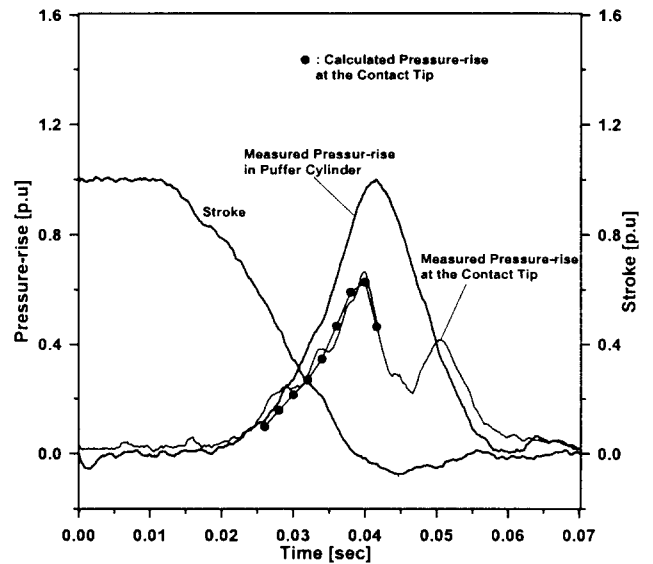


그림 11 고정 아크접점 선단의 압력상승 비교
Fig. 11 Pressure-rise in tip of fixed arcing contact

그림 11에서 알 수 있듯이 고정아크접점 선단부위에서의 압력상승은 시간구간 간격을 매우 작게 할 경우, 실험치와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 개발된 해석기법을 적용하여 차단부의 이동에 따른 파퍼실린더의 압력상승을 구하고, 구해진 파퍼실린더의 압력상승을 초기조건으로 하여 소호부의 형상모델링을 삼각형 계산격자로 세밀히 해석할 경우, 차단기의 소전류 차단성능 평가가 충분히 가능하다는 결론을 얻었다.

6. 결 론

이상의 연구결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 차단기의 개극동작을 모의하여 차단부의 냉가스 유동해석기법을 완성하였고, 해석결과는 실험치와 거의 일치하고 있다.
- (2) 해석기법에서 얻어진 결과를 초기조건으로 하여 복잡한 소호부의 형상을 정확하게 모델링할 경우, 차단부내의 압력, 밀도, 온도, 속도분포를 정확하게 예측할 수 있음을 알았다.
- (3) 전계해석과 더불어 상기의 해석기법을 활용할 경우, 차단기의 소전류 차단성능을 사전에 파악할 수 기반을 확립하였다.
- (4) 아크를 포함한 열가스 유동해석은 이러한 냉가스 유동해석을 바탕으로 이루어지므로, 본 연구에서 개발된 해석기법에 아크모델을 접목시킬 경우, 차단부내의 열가스 유동해석도 가능할 것으로 예상되며, 열가스 유동해석이 이루어질 경우 차단기의 대전류 차단성능도 또한 파악될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] M.T.C Fang and J.D. Yan, "Common problems in computer simulation of Gas Blast Arcs", 3rd international conference ECAAA 97 Vol. 1, pp. 1~7, 1997.
- [2] Allan Greenwood, Electrical Transients in Power Systems, 2nd edition, John Wiley & Sons, INC., pp92~104, 1991.
- [3] M. Hosokawa and K.Hirasawa, "Breaking ability and interrupting phenomena of a circuit breaker equipped with a parallel resistor or capacitor", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 2, pp384~392, April 1987.
- [4] Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Coproration, pp126~131, 1980.
- [5] Irving H.Shames, Mechanics of Fluids, McGraw-Hill Book-Company, pp446~pp448, 1982.
- [6] Klaus A. Hoffmann, Computational Fluid Dynamics for Engineers, Volume II, A Publication of Engineering Education System, pp88~118, 1993.
- [7] 송기동, 박경엽, 신영준, "극간절연회복향상을 위한 초고압 GCB의 노즐형상설계, 대한전기학회 추계학술대회, pp 479~481., 1995.
- [8] 장기찬, 송기동, 신영준 외, "800kV 차단부의 무부하 압력상승 측정", pp252~255, 대한전기학회 추계학술대회논문집. 1995.
- [9] Dale A. Anderson et al., Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, McGraw-Hill Book-Company, pp46~53, 1984.

저 자 소 개



송 기 동 (宋 基 東)
 1963년 7월 5일생. 1988년 인하대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 3월~현재 한국전기연구소 산업전기연구단 신전력기기연구그룹 선임연구원
 Tel : 0551-280-1563
 E-mail : kdsong@keri.re.kr



송 원 표 (宋 元 杓)
 1958년 9월 23일생. 1981년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업. 1985년 1월 효성중공업(주) 입사. 86.7-88.4 일본 히다찌제작소 파견근무. 91년 9월 경남대 전기공학과 졸업(석사). 현재 효성중공업(주) 기술연구소 차단기설계부 부장
 Tel : 0551-268-9916
 E-mail : wpsong@hyosung.co.kr



박 경 엽 (朴 敬 燁)
 1957년 1월 3일생. 1979년 서울대 공대전기공학과 졸업. 1993년 영국 Liverpool 대학 전기공학과 졸업(공학박사). 1978년 12월~1981년 5월 효성중공업(주) 전장설계부. 1981년 6월~현재 한국전기연구소 산업전기연구단 신전력기기연구그룹 그룹장(책임연구원)
 Tel : 0551-280-1561
 E-mail : kypark@keri.re.kr