

가스차단기의 소전류 차단성능 향상을 위한 유동해석

이종철[†] · 최종웅* · 강성모** · 김윤제***

Flow Analysis of Gas Circuit Breakers for Developing the Small Current Interruption Performance

Jong-Chul Lee, Jongung Choi, Sung-Mo Kang and Youn-Jea Kim

Key Words : Gas Circuit Breaker(가스차단기), Small Current Interruption Performance(소전류 차단성능), Mesh Transformation Method(격자변환기법), Cut-Cell Method(격자변환기법), Dielectric Recovery Voltage(절연회복전압), Concurrent Engineering(동시설계)

Abstract

The flow analysis is needed to verify the physical phenomena through interruption processes for improving the capacity and the reliability of gas circuit breakers. Moreover the small current interruption performance of GCBs could be predicted by coupling the flow characteristics with the electric field one. In this paper, the unsteady flow characteristics and the traveling trajectory are depicted with a commercial CFD code, PHOENICS, programmed for moving motion of objects. In order to validate computational results, the measured pressure data in cylinder and in front of arcing contact are compared with the test results of small current interruption.

기호설명

E	: 전기장도
h	: 엔탈피
p	: 압력
$p.u.$: 최대값에 대한 비율
t	: 시간
u	: 속도
V_{bd}	: 절연회복전압
ρ	: 밀도

1. 서론

차단기는 정상 작동 상태에서는 전류를 통전시키는 도체(conductor) 역할을 하지만, 전력계통에

고장이 발생했을 경우에는 접점부를 분리시켜 고장전류를 차단하여 계통과 다른 전력시스템을 보호하는 역할을 한다. 특히 70kV 이상의 초고압(Ultra High Voltage, UHV) 전력설비에는 실린더 내에 충전된 SF₆ 가스를 조작기에 의한 구동력으로 압축하여 고장전류 차단과정에서 필연적으로 발생하는 아크에 압축가스를 분사할 수 있도록 고안된 파퍼식 가스차단기(puffer-type gas circuit breaker)가 주류를 이루고 있다[1].

파퍼식 가스차단기에서 실제로 차단과정이 이루어지는 곳은 소호부(arc chamber)이며, 소호부는 압축이 이루어지는 실린더, 가스에 압축력을 전달하는 피스톤, 압축된 가스의 효율적인 분사를 유도하는 주노즐과 보조노즐, 그리고 전류를 끊어주는 이동접점과 고정접점(아크접점)으로 구성되어 있다 (Fig. 1 참조).

가스차단기의 작동 특성은 크게 소전류 차단성능과 대전류 차단성능으로 나눌 수 있다. 소전류 차단(small current interruption)은 주로 가공선 및 케이블 충전전류 차단 등의 진상 소전류 차단이 가혹한 작동 조건이고, 대전류 차단은 근거리선

[†] LG 산전(주) 전력연구소
E-mail : jcleed@lgis.com
TEL : (043)261-6629 FAX : (043)261-6535

* LG 산전(주) 전력연구소

** LG 산전(주) 전력시스템 사업부

*** 성균관대학교 기계공학부

로고장(SLF)과 차단기 단자단락고장(BTF)에 대한 작동 조건이 중요한 규격 요건이다. 2001 년 IEC 규격 62271-100 의 개정[2]으로 가스차단기의 소전류 차단책무가 매우 엄격해졌기 때문에 지금까지 상대적으로 소홀히 여겨졌던 이 부분에 대한 준비가 필요한 실정이다. 소전류 차단성능은 접점이 분리됨에 따라 발생하는 압축과정에 의한 분무가스의 두 접점(이동접점과 아크접점) 사이의 가스밀도와 전계강도에 의해 좌우되므로, 소호부에 관한 유동해석을 통해서 밀도변화를 소전류 차단에 유리한 방향으로 이끌 수 있다면 설계 및 시제품 제작과정에 소요되는 막대한 경제적 비용절감은 물론 시간적으로도 많은 절약을 가져올 수 있다.

본 연구에서는 위에서 설명한 소전류 차단성능의 신뢰성을 확보하기 위한 가스차단기의 설계를 위해서 유동해석을 수행하였다. 가스차단기 소호부의 복잡한 형상 모델링을 원활히 처리하기 위해서 분할격자기법(cut-cell method)을 사용하는 상용 CFD 코드인 PHOENICS 를 주프로그램으로 사용하였으며, 피스톤과 아크접점의 이동현상을 모사하기 위해서 격자변환기법 (mesh transformation method)을 프로그래밍하여 주프로그램과 연결시켜 계산을 수행하였다. 계산된 결과를 검증하기 위하여 실린더 내부와 아크접점 선단에서 측정된 압력데이터를 비교하였으며, 전계 해석 프로그램인 FLUX2D 를 사용하여 계산한 아크접점의 전계강도와 유동해석으로부터 구해진 가스밀도를 연결하여 절연회복전압(dielectric recovery voltage)을 계산한 것을 소전류 차단시험 결과와 비교하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

가스차단기 내부의 유동은 비정상, 압축성 난류유동이며, 이에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{u_i} \quad (2)$$

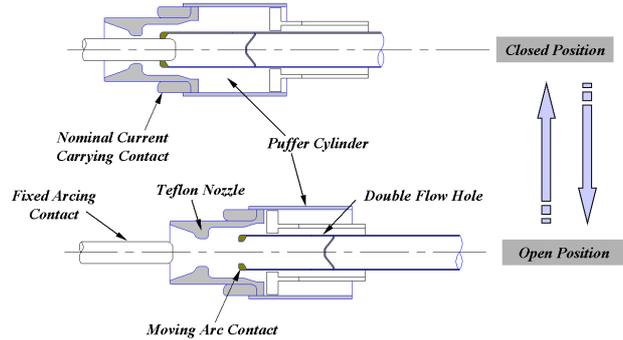


Fig. 1 Structure and operating mechanism of GCBs

에너지방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} + S_h \quad (3)$$

난류에 대한 미지의 correlation 항을 결정하기 위하여 표준 k-ε 모델을 사용하였으며, 자세한 방정식과 기호설명은 참고문헌[3]을 참고하기 바란다.

2.2 경계조건

Figure 2 에 가스차단기 내부의 유동해석을 위한 해석영역을 나타내었다. 시뮬레이션의 편리함을 위하여 Fig. 1 의 작동원리와는 반대로 실제에서는 고정부인 피스톤과 아크접점이 움직인다고 가정하였다. 초기 유동장은 정지상태의 6 기압 SF₆ 가스가 충전되어 있으며, 피스톤과 아크접점의 스트로크는 실험에 의해 얻어진 시간과 거리의 정보를 다항식으로 함수화(polynominal interpolation)하여 계산에 사용하였다. 해석영역의 좌우 끝단은 Neumann 조건을 사용하였다.

2.3 분할격자기법

CFD 가 산업기술분야 적용에 더욱 유용한 도구로 발전하기 위해서 실제조건을 그대로 시뮬레이션 하는 점점 더 복잡한 문제를 해석하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 하지만 유동장 형상이

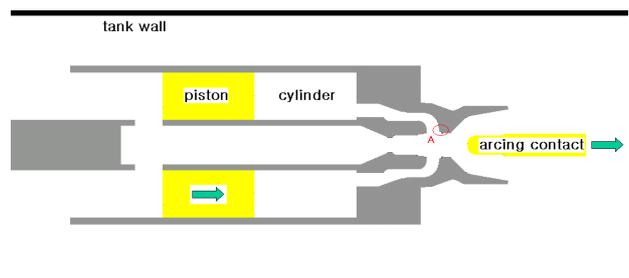


Fig. 2 Calculation domain on the GCB

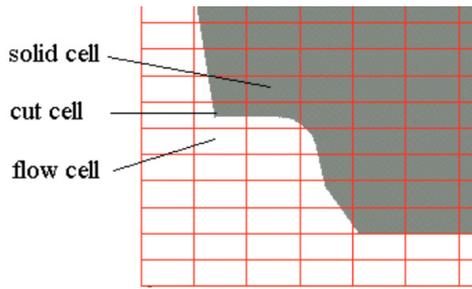


Fig. 3 Three types of cell in the calculation domain

복잡한 경우와 유동장 내부에 여러 형태의 물체가 존재하며 이동하는 문제에 대해서는 기존의 이동 일반곡선좌표계(moving body-fitted coordinate)에서 모델링하여 해석하기에는 상당히 힘든 문제이다. 이와 같은 문제에 대처하기 위하여 90년대 중반부터 발전하기 시작한 분할격자기법(cut-cell method)은 바탕격자(background mesh)인 직교격자에 임의 형태의 물체를 삽입하는 방식으로 항공분야에서 처음으로 시도되었으며, 현재 많은 분야에서 응용되고 있다[4]. 분할격자기법은 바탕격자에 고체 영역이 삽입되어 기존의 격자는 유체부와 고체부가 공존하는 분할격자를 포함하게 되고, 이 분할격자는 경계와 일치하는 부분의 한 면을 가지게 되므로 경계좌표표면을 만들 필요가 없는 경계 일치격자(boundary conforming mesh)가 된다. 따라서 기존 개념의 격자생성이 필요치 않으며, 추가되는 계산과정은 바탕격자에 삽입되는 물체에 의해 발생하는 교차점을 구하는 것이다. Figure 2의 A 부분은 Fig. 3과 같이 전체가 고체영역인 solid cell, 전체가 유체영역인 flow cell, 고체와 유체가 공존하는 cut cell 등 세가지 형태의 격자로 구성되어 있다.

2.4 격자변환기법

유동장 내부 물체의 이동을 모의하기 위한 방법으로 흔히 사용되는 이동격자법(sliding mesh method), Chimera 법(composite overlapping block structure approaches)[5], FAME 법(flexible mesh embedding techniques)[6] 등은 복잡한 보간기법의 문제점을 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서는 차단부내 피스톤과 고정점점의 상대운동을 모델링하기 위하여 시간에 대해서 고정된 계산격자 안에서 셀의 물질특성을 변화시키는 격자변환기법(mesh transformation method)을 사용하였다. 이 방법은 스트로크(stroke)에 따른 각 스텝의 이동거리를 계산하여 고체영역인 피스톤과 고정점점의 셀 위치를 파악하며, 이동이 일어나는 순간에는 진행방

향 전방의 유체격자는 고체격자로 변환되고, 후방의 고체격자는 유체격자로 바뀌면서 피스톤과 고정점점의 운동을 모사하는 것이다. 물체가 유동장 안을 움직이게 되면 물체 벽면의 속도는 물체의 이동속도와 같은 값을 가지며, 이것은 이동 물체 주변 격자에서 운동량 생성항으로 작용하게 된다. 따라서 전체 유동장에 물체가 이동하면서 생기는 운동량 생성에 대한 부분을 적절하게 대입해 주면 될 것이다. 이와 같은 방법으로 피스톤과 아크점점의 이동을 적용하기 위하여 Fortran 으로 된 부 프로그램을 작성하였고, 이를 주프로그램인 PHOENICS 와 원활히 연결시켜 유동장을 계산할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실린더 압력상승과 점점 사이의 유동특성

해석 모델에 대한 수치해석 결과를 검증하기 위하여 피스톤 전면과 아크점점 선단에서 측정된 압력값을 Fig. 4와 Fig. 5에 백분율비로 비교하였다.

Figure 4는 피스톤 전면에서의 압력에 대하여 측정결과 및 FVFLIC(Finite Volume Fluid in Cell)법[7]에 의한 해석결과, 그리고 본 연구의 결과를 비교한 것이다. 피스톤 압축에 의한 실린더 내부 압력상승은 가스차단기의 아크 소호능력에 큰 영향을 미치며, 전류영점에서 아크를 차단하는데 필요한 능력을 얻기 위해서는 충분한 압력상승이 확보되어야 한다. 스트로크 시작과 함께 상승되는 압력은 아크점점이 노즐목을 완전히 빠져나가 아크점점과 노즐 하류장 사이의 충분한 유동공간이 확보되는 지점인 스트로크가 70% 진행된 이후에

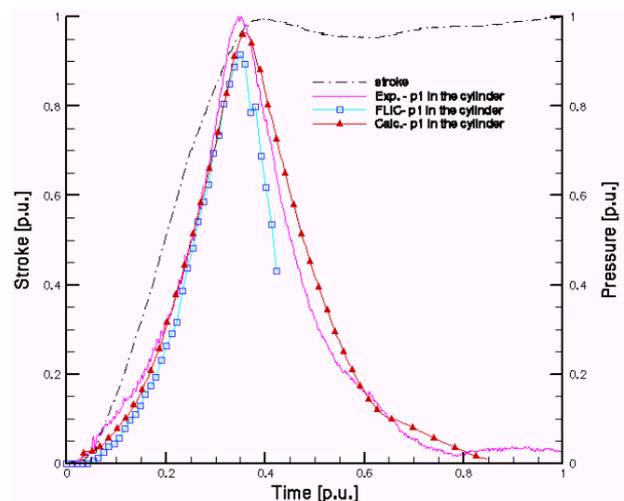


Fig. 4 Comparison of pressure-rise in the cylinder

도 계속 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이는 노즐 목 부근에서의 유동이 하류에서의 조건에 관한 정보가 상류로 전달될 수 없는 즉, 노즐에서의 유동 조건에 아무런 영향을 미치지 못하는 상태인 유동이 질식(choking)되었기 때문이다. 따라서 노즐의 개방과 같은 배압(back pressure)의 변화에 관계없이 빠져나가는 질량 유량이 일정하게 되므로, 실린더에서 노즐목에 걸쳐 계속적으로 압력 상승이 이루어지게 된다. 본 연구의 계산결과는 최대압력 상승이 발생하는 시간에 관해서는 FLIC 법과 비슷하게 정확한 값을 예측하고 있지만, 최대압력 상승치의 정확성 및 스트로크가 모두 끝난 후의 경향은 FLIC 법보다 정확하게 실험결과를 예측하고 있음을 볼 수 있다. 이는 노즐과 고정접점 사이에서 발생하는 충격과와 초음속 유동에 대한 본 연구 해석방법의 타당성을 판단할 수 있는 것이라 할 수 있다.

아크접점 중심부에 압력센서를 설치하여 측정된 데이터를 해석결과와 비교하였으며 이를 Fig. 5 에 도시하였다. 차단부를 구성하고 있는 부분 중에서 아크접점 부근은 극간 절연회복 특성이 가장 취약하기 때문에 이 부분에 대한 전계해석과 더불어 정확한 유동해석이 이루어져야 한다. 하지만 실험에서 측정된 고정접점 선단부의 압력은 노즐목을 지나 생성되는 초음속 유동장이 고정접점에 부딪치면서 운동에너지 감소로 발생하기 때문에 실린더 내부의 압력상승에 대한 예측만큼 정확한 해석결과를 이끌어 내는 것은 어렵다고 판단된다. 본 연구의 결과를 살펴보면, 정량적으로는 정확히 예측하지 못하고 있지만 정성적으로 매우 일치하며, 기존의 다른 수치해법보다 정확한 과도특성을 예

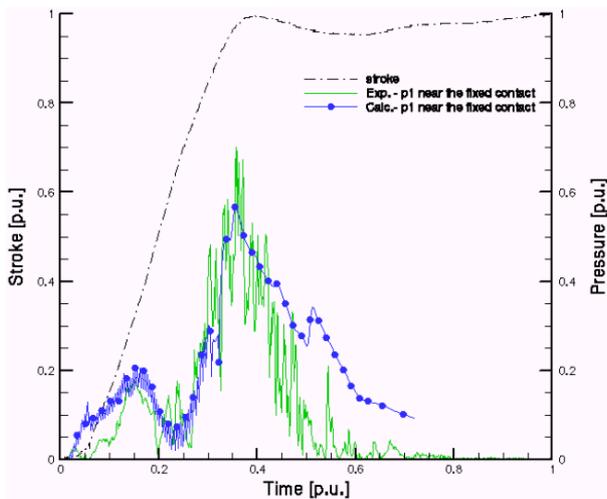


Fig. 5 Comparison of pressure-rise in front of the arcing contact

측하고 있다. 이는 본 연구에서 적용한 해석기법의 타당성을 입증할 수 있는 것으로 Causon 등 [8]의 연구결과와 같이 초음속 유동해석에 대한 분할격자기법의 타당성을 평가할 수 있는 충분한 결과라 판단된다.

3.2 절연회복전압

차단기의 소전류 차단성능해석을 위한 방법은 실험적인 상수값을 이용하는 방법과 스트리머 이론을 적용한 방법이 있다. 본 연구에서는 전자의 방법을 사용하며, 이는 전계해석에 의한 전계값과 유동해석에 의한 밀도값의 상관식을 이용하여 차단기 두 전극 사이의 절연회복전압을 식(4)를 이용하여 구할 수 있다[9].

$$V_{bd} = a \frac{\rho^b}{E} \tag{4}$$

여기서 a, b 는 실험상수이다.

유동해석으로부터의 아크접점 근방의 가스밀도와 전계해석으로부터 구한 전계강도를 위의 식에 대입하여 스트로크 이동에 따른 절연회복전압의 변화를 Fig. 6 에 나타내었다. FAC30-60 은 아크접점 선단부의 30°~60° 부근을 나타내며, FAC90 은 90° 부근을 의미한다. 이는 전계가 집중되며, 동시에 유동박리에 의하여 밀도가 감소되는 지점을 선정 한 것이다. 실제 소전류 차단시험에서 재발호(restrike)가 발생한 스트로크 시점과 계산상 허용전압보다 작아지기 시작하는 시점이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 가스차단기 설계에 매우 유용한 자료로 이용될 수 있으며, 접점사이의 전계강도와 밀도를 설계변경에 의하여 적절히 변화시키면 소전류 차단성능이 뛰어난 제품을 설계하는데 일조할 수 있을 것이다.

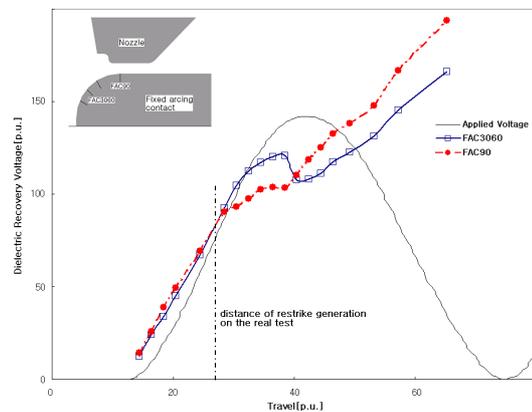
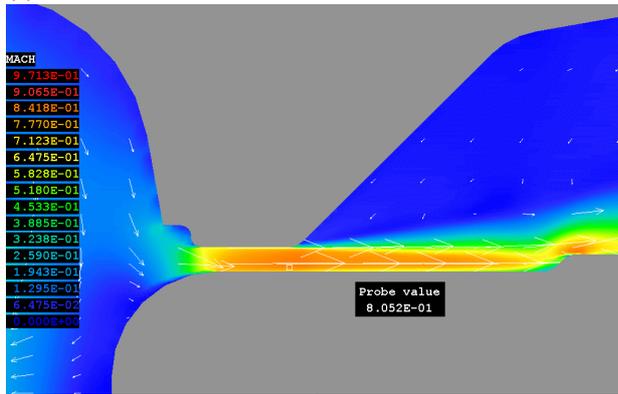


Fig. 6 Dielectric Recovery Voltage of the GCB

(a) Mach number



(b) Density

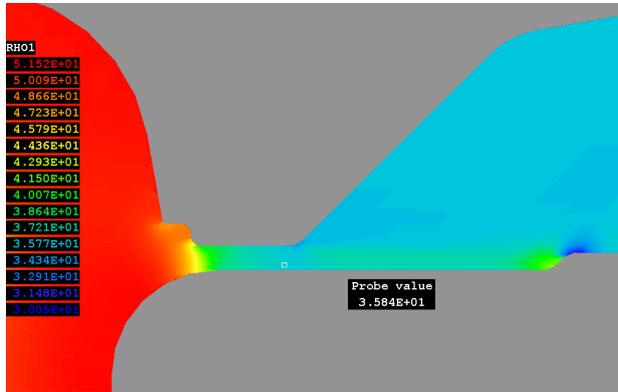


Fig. 7 Flow characteristics at the time of restrike

Figure 7 에 재발호가 일어나는 시점에서의 밀도장을 나타내었다. 아크접점 부근의 밀도변화가 심하게 발생하지 않지만, 노즐목을 통과하면서 발생하는 압축성 효과에 의하여 밀도의 변화가 심하게 발생할 것을 예상할 수 있으며, 이런 변화를 가능한 적게 노즐을 설계하는 것이 바람직하다.

4. 결론

가스차단기의 소전류 차단성능 향상을 위해 유동해석을 수행한 본 논문의 결론은 다음과 같다.

- 1) 실린더 내부 피스톤 전면부와 아크접점 선단부에서의 압력을 스트로크에 따라 측정한 값과 비교한 결과 정량적으로 일치하는 결과를 얻었으며, 본 연구에서 적용한 분할격자기법 및 격자변환기법의 타당성을 확인할 수 있었다.
- 2) 가스차단기의 소전류 차단성능을 평가하기 위하여 전계해석 결과와 연결하여 계산한 절연회복 전압값은 실제 소전류 차단시험의 결과와 비교한

결과 재발호가 발생하는 지점을 정확히 예측하였다.

3) 이는 노즐목에서 발생하는 압축성 유동효과 때문에 가스차단기의 소전류 차단성능 향상을 위해서는 아크접점이 노즐목을 통과할 때 가능한 밀도변화를 적게 할 수 있는 설계가 요구된다.

4) 이와 같이 본 연구에서 제시한 유동해석방법은 격자생성에 요구되는 모델링 시간을 최소화할 수 있기 때문에 전산유체역학이 산업체의 제품설계에 신속하면서도 정확하게 대처할 수 있는 동시설계(concurrent engineering)가 가능해지리라 사료된다.

참고문헌

- (1) Klaus Ragaller, 1978, "Current Interruption in High-Voltage Networks", Plenum press, pp. 269-294.
- (2) "High-Voltage Alternating Current Circuit Breakers", IEC pub. 62271-100.
- (3) Jong C. Lee, Heui-Sub Ahn and Youn J. Kim, 2002, "A Study on the Characteristics of Flow Field through Nozzles Used in a GCB", The Fifth JSME-KSME Fluids Engineering Conference, pp.
- (4) Berger, M. J., Aftomis M. J., Melton, J. E., 1995, "Adaption and Surface Modelling for Cartesian Mesh Methods", AIAA-95-1725-CP, pp. 881-891.
- (5) Steger, J. L., Dougherty, F. C., Benek, J. A., 1983, "A Chimera Grid Scheme", In Advances in Grid Generation, ASME FED-5, Ghia KN, Ghia U (eds), pp. 59-69.
- (6) Albone, C. M., 1992, "Embedded Meshes of Controllable Quality Synthesized from Elementary Geometric Features", AIAA Paper, No. 92-0662.
- (7) Zhao, Y., Winterbone, D. E., 1995, "The Finite Volume FLIC Method and its Stability Analysis", Int. J. Mech. Sci., Vol. 37, No. 11, pp. 1147-1160.
- (8) Causon, D. M., Ingram, D. M., Mingham, C. G., Yang, G., Pearson, R. V., 2000, "Calculation of Shallow Water Flows Using a Cartesian Cut Cell Approach", Advances in Water Resources, Vol. 23, pp. 545-562.
- (9) Endo, F., Sato, M., et al., 1989, "Analytical Prediction of Transient Breakdown Characteristics of SF6 Gas Circuit Breakers", IEEE Trans. On Power Delivery, 89 WM 075-3, pp. 1731~1737.