

SF₆ 가스절연개폐기의 냉가스유동해석과 전계해석을 기초로 한 차단성능평가

배 동진* , 송 태현, 최 영찬, 이 기주, 김 익모, 강 중호
현대중공업 (주) 마북리연구소

**Circuit Interruption Performance Evaluation of SF₆ GIS
Based Results of Cold Flow and Electrical Field Analysis**

Dongjin Bae* , Tae-Hun Song, Young-Chan Choi, Ki-Ju Lee, Ik-Mo Kim, J.H. Kang
Mabook Institute , Hyundai Heavy Industries.Co.,Ltd.

Abstract - The performance of circuit interruption of SF₆ puffer cylinder type gas circuit breaker(GCB) has been evaluated from the results of electrical insulation strength which is depend on material property, such as SF₆ gas density in circuit breaker tank. In order to determine circuit breaker dimension in the safety criteria, electrical field analysis has been done by finite element method. Gas density of concerned area in the circuit breaker has been calculated. In order to predict small current break performance, Electrical field analysis result must be calculated based the results of density from cold flow dynamics. The proposed method has been carried out and evaluated for 362kV class high voltage GIS.

1. 서 론

70년대 후반에 국내에서 처음 생산이 시작된 파퍼형 SF₆가스차단기(GCB)는, 이후 전력사용량 증가에 따른 대용량화에 발맞추어 단위용량이 계속 증가되고 있고, GIS(Gas Insulated Switchgear)보급과 함께 고전압 전력용 차단기의 주요 제품으로 자리매김하게 되었다. 국내에서 사용되는 파퍼형 SF₆차단기는 탱크형이 주종을 이루고 있어서, 탱크 내에 고압의 SF₆절연가스가 충전되어 있고 그 안에 소호실이 설치되는 구조가 주종을 이룬다.

차단기의 기본적인, 가장 중요한 역할은 전력계통에서의 단락고장전류를 차단하는 기능이다. 차단기의 차단성능여부는 차단소호성능에 있는데, 파퍼실의 가스압력에 크게 영향을 받는다. 이 압력은 조작특성, 파퍼실 크기, 노즐단면적, 차단하는 전류 및 아크시간 등에 의존하기 때문에 소호실의 해석 및 설계는 조작기구에서 차단하는 전류를 포함해서 종합적인 가스압축 및 유동메카니즘에 따른 가스밀도, 압력, 속도 등을 시간에 따라 변천하는 과정을 잘 이해하는 게 필요하다. 따라서, 가스차단기 개발시 무부하시의 냉가스 유동해석 및 전류차단시의 열가스 유동해석은 차단성능을 향상시키고 소호화, 최적화하기 위해서 수행해야 하는 중요한 과정이다.

한편, 초고압차단기의 동작특성상 차단 후에는 복잡한 파형을 갖는 회복전압이 소호실 극간양단에 인가되는데, 이 경우 차단의 성공여부를 예측할 수 있는 해석기법으로, 차단기내부의 극간에 절연가스 밀도변화에 따른 전계해석을 결과를 평가하여 절연회복특성을 고찰해야 하는 과정이 필수적이다.

본 연구에서는 가스절연개폐기 내의 유동메카니즘의 고찰을 위한 냉가스 유동해석과 소호후 절연회복과정의 안정성확보를 위한 전계해석을 행하고 가스밀도 분포에 따른 절연내력을 변화와 과도회복전압간의 관계를 파악하고, 이를 실험모델에 적용한 결과를 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 차단 원리

탱크형 차단부의 기본구조는 그림1과 같다. 그림에서 처럼 차단부는 고압의 탱크에 SF₆절연가스를 충전시키고, 차단시 실린더의 피스톤작용에 의한 순간적인 압력 상승에 의한 압력차에 의해 가스의 유동을 유도해서, 이를 통한 소호작용을 하는 구조로 되어 있다.

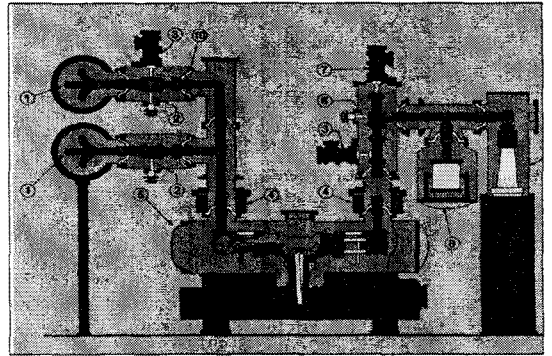


그림 1 차단기 일부분구조

계통에서의 단락사고 발생시 차단지령에 의해 조작기구가 구동이 되고, 이 때 파퍼형실린더가 움직이면 압축실내의 SF₆가스가 급속히 압축된다. 이 압축가스가 노즐부를 통하여 전극간에 배출되면 접점이 떨어지면서 발생된 아크를 붙어서 소호시키는 구조로 되어있다. 대전류 차단시에는 아크기둥이 노즐을 폐색시키는 현상이 일어나므로, 이를 적절히 이용하여 실린더내의 압력상승에 기여하도록 하고 있으며 전류영점부근에서는 강력하게 가스가 분출되는 역할을 한다. 또, 소전류차단시에는 비교적 약한 분출압력으로 되어 전류재단현상을 저감시킨다. 이와 같이 파퍼실린더 GCB는 구조 및 동작원리가 간단하여 대용량화가 가능하고 신뢰성이 높다는 특징이 있어 널리 사용되는 추세이다.

2.2 차단현상 해석 기초기술

차단원리에서처럼 GCB의 차단성능은 실린더의 압력상승에 큰 영향을 받는다. 이 때의 압력은 조작부의 조작특성, 실린더크기, 노즐부 형상, 차단전류, 아크시간 등에 의존하기 때문에, 차단부 소호실 설계는 기계적인 조작부에서 열유체현상, 전기적인 절연설계, 전계해석 등의 전 과정을 종합적으로 파악하여 가스압력의 변동특성을 아는 것이 중요하고, 이들 변수들의 상호관계를 체계적으로 종합화하여 차단성능을 평가하는 과정이 차단기 설계에 있어서는 중요한 과정이 되고 있다. 차단현상을 모사하여 이해하기 위한 주요 해석기법은 유동해석과 전계해석의 경우라 할 수 있다.

2.3 냉가스 유동해석과 전계해석

차단부 내에서 발생하는 유동현상 해석은 아크발생을 고려하지 않은 무부하상태의 냉가스 유동해석과 아크발생을 고려한 열가스 유동해석으로 나눌 수 있는데, 이들은 모두 압축성가스 해석기법과 실린더 이동에 따른 이동경계조건을 다루어야 한다.

냉가스 유동해석에서는 소호부내의 가스속도, 밀도, 압력 등을 계산하여 노즐 및 접점의 형상, 실린더 출구의 형상, 실린더 용량, 배기구 단면적 등에 대한 연구에 활용하며, 열가스 유동해석은 차단 여부의 파악, 차단성능의 확인 등 냉가스 유동에 비해 더욱 실제적이고 사실에 근접한 데이터를 얻을 수 있지만, 아크의 물리적 현상이 매우 복잡하여 정확한 수학적 모델링이 어렵고 아크열로 인한 열원입력함으로 인해서 해를 수립하기가 매우 힘들어 해석이 어렵다.

차단기 내부의 유동은 높은 압력하에서 짧은시간 내에 노즐과 이동접점이 움직이기 때문에 밀도, 압력, 속도의 변화가 매우 크게 일어나며 경우에 따라서는 마하수(Mach Number)가 1보다 큰 초음속 유동이 된다. 따라서, 차단기 내부 유동은 기본적으로 비정상 상태의 점성이 존재하는 매우 복잡한 압축성 난류 유동이라고 볼 수 있다. 그러나 점성의 효과는 경계층 내부에서만 지배적이며 대부분의 속도가 큰 유동에서처럼 경계층이 매우 얇기 때문에 비점성 유동이라 가정하여도 우리가 실제적으로 얻고자 하는 중요한 데이터인 밀도와 압력에는 그다지 중대한 영향을 미치지 않는다.

이러한 차단부 내부에서의 유동장의 해석을 위해서는 비정상상태(Transient State), 압축성유체(Compressible Fluid)해석이 가능해야하고, 계산영역의 일부가 이동할 수 있어야 하며(Moving Grid or Moving Boundary), 아크발생으로 인한 열원을 계산하는 루틴을 별도로 작성하여 계산격자에 반영시킬 수 있어야 하는데, 현재까지 이들을 모두 만족하는 상용유동해석 소프트웨어는 없기 때문에 제작업체 또는 연구기관에서는 차단성능계산 전용프로그램을 독자적으로 개발하여 사용하고 있는 실정이다.

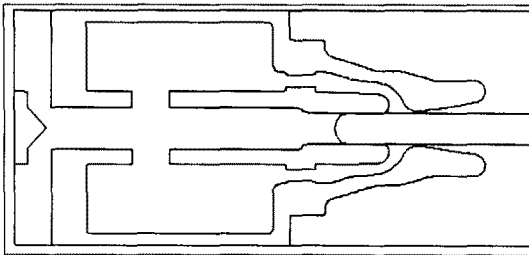


그림 2 유동해석 모델링

그림 2에는 유동해석에 사용된 해석모델링을 나타내었다. 유동의 관점에는 유로를 형성하는 형상이 표현되어야 하므로 실린더의 압력이 노즐부 상류장을 통하여 하류장에서 노즐목을 기준으로 역류하는 형태와 고정아크 접점으로 배출되는 형태를 잘 표현하는 모델링으로 구성되어야 한다.

차단기의 유동해석은 압축성가스와 이동경계조건을 동시에 해석할 수 있어야 하는데, 계산과정에서 나타나는 수렴성 문제 때문에 가급적 그리드수를 줄여야 하므로 유동에 직접적인 영향을 미치는 형상을 최소한으로 추출하여 모델링을 해야 한다. 따라서, 실린더 내부, 노즐부, 접점부 등의 최소한 모델과 실린더이동효과를 해석단계에서는 피스톤과 접점이 이동하는 것으로 대체하여 모델링하고, 역류구의 시간에 따른 개폐시점을 해석에 반영하기 위해 그림2에서 좌측개폐구는 역류구 개리시, 중간개폐구는 역류구폐쇄를 순차적으로 구현해 준다.

여기서는 GCB 내부 유동해석기술 개발을 위한 시작 단계로써 차단기 내부에서 아크발생을 고려하지 않은 냉가스 유동해석을 상용 프로그램을 이용하여 계산하고, 결과로 얻어진 각부의 가스밀도를 전계해석의 기본자료로 이용하였다.

본 연구의 주요관심사가 극간의 절연회복특성에 있으므로 극간전계해석에 필요한 조건을 살펴보면, 해석영역 내의 절연물의 비유전율, 가동부 및 고정부의 전압인가 조건, 각 접점 및 노즐부 형상, 이격거리 등을 고려한 모델링이 되어야 한다. 이때 최대전계강도와 크기에 미치는 설계변수의 영향을 중심으로 평가된다.

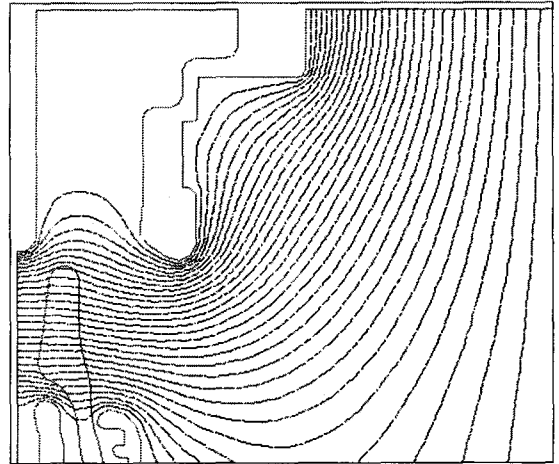


그림 3 전계해석모델링과 등전위선 분포

그림 3에는 전계해석결과를 등전위선으로 나타내었다. 이 경우, 극간 전계해석을 위주로 고찰했으며 특히 고정아크접점에서의 최대전극이 나타나는 곳을 중심으로 해석결과를 고찰한다. 극간에서의 전계에 영향을 미치는 인자는 기하학적인 형상이 위주이고, 재질적인 측면에서 절연물의 유전율을 고려하여 해석한 결과를 고찰한다.

2.4 사례연구

2.5.1 유동해석결과

전술한 과정에 따라 362kV급 GCB의 차단성능 중 소전류차단성능평가를 위한 해석결과를 도출해 보기로 한다. 먼저, 냉가스유동해석에서 계산된 결과를 고찰하기로 한다. 절연회복특성에 영향을 미치는 가장 중요한 유동파라미터는 고정아크접점 선단에서의 밀도분포이다. 차단부 전체에 걸쳐서 이 부분에 전계가 가장 집중되며 가스의 밀도가 가장 급격히 변화하므로 전기적으로 극간절연성능에 문제를 일으킬 수 있기 때문이다.

계산조건으로는, 초기 압력을 6기압, 초기온도는 25℃로 가정하였으며 계산영역은 GCB 내부 전체가 아닌 일부분으로 잡았는데, 이는 계산해의 수렴성에 대한 몇번의 시행착오적 과정을 거치면서 그리드를 최소화하였고, 오차범위가 크지 않은 범위에서 해석영역을 줄여나갔다.

그림 4에는 차단부 조작부 동작과정 중, 실린더가 스트로크에 따라 이동할 때, 피스톤 전면부의 압력평균값을 계산하여 시간함수로 나타낸 것이다. 초기 압력 6기압에서 최대21기압까지 압력이 상승되는 것을 볼 수 있으며, 다른 차단기의 경우와 비교했을 때 압력상승의 일 반적 경향을 보여주고 있다. 해석영역에 따라 스트로크가 끝나는 30ms 이후에는 최초의 6기압보다 떨어지는 양상을 보이기도 하는데, 이는 압축성가스유동해석이 인접영역에 미치는 영향으로 보여지나, 여기서는 최대압력상승과 상승시간이 주요관심사이다.

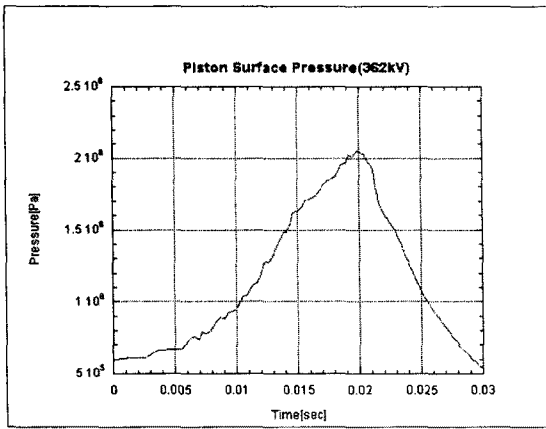


그림 4 피스톤 압력 변화 추이

그림 4의 피스톤의 압력변화가 유동의 원인을 제공하는 측면이라면, 그림 5에서는 유동의 결과로 나타난 밀도변화를 고정접점의 각 부분에서 시간에 따라 나타내었다. 고정아크 접점은 소전류차단시의 아크소호 후 재점호 가능성을 판단하는 중요한 역할을 하므로, 이에 대한 설계고찰 항목으로 밀도에 따른 절연내력을 계산하는 데 기초자료로 사용한다. 이 때, 계산된 밀도에 따라 절연가스의 절연내력이 계산될수 있어서 전계해석에서 대전계와 비교될 수 있다. 고정아크접점의 밀도 변화 중 각도0도 즉 아크 접점 정중앙에서는 밀도변화가 심하게 나타나지만, 가스유로의 중심이라는 측면에서 절대 밀도값은 매우 큰 편이어서 절연회복전압은 매우 크게 나타나는 것이 특징으로 보여진다.

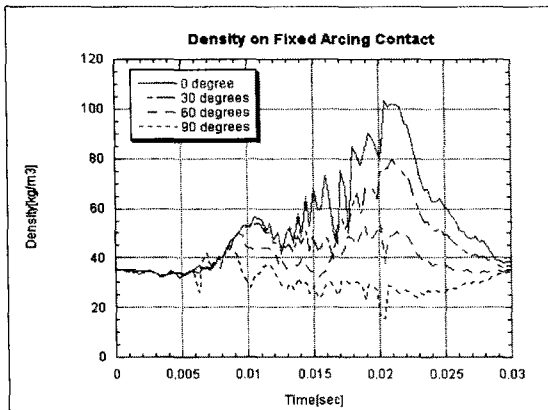


그림 5 고정접점 각부의 밀도변화

2.4.2 극간절연회복특성 검토

차단부 내에서 국부적인 전계집중을 완화하기 위해 아크접점간의 이격거리에 따른 유동해석과 전계해석 결과를 토대로 극간절연회복특성을 평가하고 이를 접점이나 노즐의 형상을 설계하는 자료로 이용할 수 있다.

차단기는 대전류차단성능과 소전류차단성능을 동시에 만족시켜야 하는데, 그 중 소전류차단성능은 진상소전류 차단이 추가 되고 있다. 진상소전류차단은 개로된 장거리 선로나 케이블과 콘덴서뱅크를 개로하는 때에 일어난다.

계통에서 이런현상이 일어나면 최대 2PU에 해당하는 전압이 차단기의 극간에 일어나므로 재점호 등 위험한 상황이 초래될 수 있다. 일단 재점호가 일어난 후 전

류를 차단하면 전압이 상승하고 외부섬락이나 콘덴서 파괴 같은 극한상황이 발생하게 된다.

진상소전류 차단특성은 극간의 절연회복능력과 밀접한 관계가 있고, 차단부 개리속도, 점접형상등에 영향을 많이 받는다. 진상소전류차단시 SF₆가스가 분해되고, 이온화되지만 냉가스로 취급하여 절연회복특성을 고찰할 수 있다.

통상 1점절로 구성된 차단부에서 진상소전류차단시 전점절에 인가된 과전압은 다음과 같이 표현된다.

$$V_c(t) = \frac{V_i}{\sqrt{3}} \sqrt{2} (1 - \cos(\omega t)) * (100 \sim 110)\% [kV] \quad (1)$$

그림 6에는 전계해석결과와 유동해석결과를 이용해서 각부분의 절연회복특성을 구한 것을 도식화한 것이다. 그림에서 나타나듯이 절연회복특성은 어느경우든지 충분한 안전율을 확보한 것으로 나타난다. 그림에서 TRV곡선보다 다른 곡선들이 훨씬 더 큰 값을 가지는 것으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

그래프 중에 시간에 따른 데이터의 변동폭이 큰 FAC0의 경우는 유동해석시의 해의 수렴성 또는 압축성 가스의 특성이 반영된 결과로 사료된다.

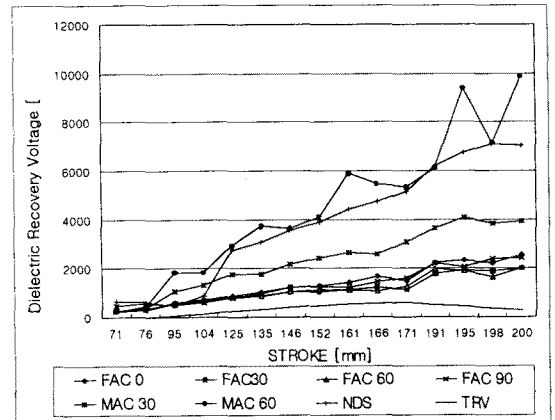


그림 6 스트로크에 따른 절연회복전압 추이

3. 결 론

차단기 설계에 있어 진상소전류 차단특성을 평가하기 위해 냉가스 유동해석과 전계해석 결과를 토대로 극간절연회복특성에 대해 기술하였다.

해석에 사용된 모델은 진상소전류 차단특성 측면에서는 충분한 설계여유를 지니고 있는 것으로 평가된다.

본 연구는 해석기법의 적용 측면에서 수행되었지만, 향후 이를 설계에 적용하고자 할 때에는 몇 가지 설계변수를 변경시켜가면서 최적의 설계안을 도출하여야한다. 극간절연회복특성에 영향을 미치는 설계변수로 소호실의 형상변수 이외에 가동아크접점의 개리속도가 큰 영향을 미친다. 따라서, 향후에는 개리속도를 감안한 최적의 설계안을 도출하는 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 362kV 63kA GIS설계 및 제조기술에 관한 연구, 증간 보고서, 한국전력공사, 1995
- [2] J.Y.Trepanier, X.D.Zhang, H.Pellegrin, R.Camarero, "Application of Computational Fluid Dynamics Tools to Circuit-Breaker Flow Analysis", IEEE, Trans. on Power Delivery, Vol.10, No.2, Apr.1995