

**이동격자를 이용한 72.5kV~800kV 초고압 차단기 유동해석**

윤자홍, 최병화, 이기혁, °윤치영, 고경석, 민병수\*, 박일석\*  
 현대중공업(주) 신제품개발실, \*산업기술연구소

**CFD Analysis of 72.5kV~800kV GIS with Moving Grid**

J. H. Yoon, B. H. Choi, K. H. Lee, C. Y. Yoon, K. S. Koh, B. S. Min, I. S. Park  
 Hyundai Heavy industries, Co., Ltd.

**Abstract** - To develop GIS (Gas Insulated Switchgear), prediction of the flow field including pressure in GIS is very important. The transport phenomena in GIS including arc is also being studied in these days. In this study, to predict the arc behaviour for GIS with voltage rating up to 800kV developed by HHI (Hyundai Heavy Industries Co. Ltd.), the analysis of flow and electric field in GIS were investigated.

To simulate the compressible flow in GIS, the CFX, commercial CFD code, was used. The movement of the piston and the electrode of the GIS was simulated with moving grid method, which was superior to the method of varying the property of cells in the aspect of accuracy and convergence of solution. The calculated maximum pressure within the puffer cylinder was matched with experimental data within 5% error. Also, the oscillation of pressure in GIS after the movement of electrode was well predicted.

**1. 서 론**

초고압전력기기는 중전기기종에서 부가가치가 매우 높고 전기에너지의 수요증가와 더불어 지속적으로 성장하는 안정적 산업분야이며 국가적 기간산업에 속한다.

가스절연개폐장치(GIS: Gas Insulated Switchgear)는 차단기, 단로기, 접지개폐기, 변류기 등 변압기를 제외한 대부분의 전력기기를 금속탱크로 밀폐시킨 변전시스템으로 기중절연 변전소에 비하여 규모를 축소시킬 수 있어 설치면적이 작게 소요된다. 뿐만 아니라 각종기기를 외부와 차단시켜 안전한 환경에서 동작시킴으로써 고장이 발생할 확률을 크게 줄여 신뢰성을 향상시키고 있다. 또한 GIS는 환경 친화적으로 제작이 가능하여 도심지와 같이 전자파 문제에 민감하고 설치면적이 협소한 곳에 적합하다.

현재 유럽에서는 대대적인 M&A 및 신기술 개발을 통하여 경쟁력을 유지하는 한편 적극적인 해외시장 개척으로 사업영역을 확장하고 있으며 일본은 최적설계 및 신기술 개발로 원가절감을 통한 경쟁력 제고에 심혈을 기울이고 있다. 이와 같이 유럽, 일본의 선진 제작업체에서는 기술력을 바탕으로 축소되고 높은 신뢰성을 가지는 GIS를 개발하기 위하여 지속적으로 노력하고 있다.

가스차단기의 경우 소호 가스를 효율적으로 이용하는가에 따라 차단기의 차단성능이 결정되므로, 차단과정에 있어서 실린더 내의 압력상승뿐만 아니라 소호부내에서의 가스유동을 면밀히 관측할 필요가 있다. 새로운 형태의 가스차단기를 개발하거나 기존 차단기의 성능개선을 위해서는 유동해석과 전계해석 기술은 반드시 확보해야

만 하는 기술이다. 따라서, 유럽과 일본을 비롯한 선진 외국에서는 이미 차단부내의 해석 프로그램을 자체 개발하거나 상용 프로그램을 활용하는 기술을 개발해 왔다. 현재 이러한 업체에서는 GIS내에 아크에 대한 해석 수준도 일정수준에 도달하여 GIS 개발 시에 아크 해석 기술을 활용하고 있음을 최근 연구 발표를 통하여 확인할 수 있다.

본 연구에서는 상용 전산유체역학 (CFD: Computational Fluid Dynamics) 코드인 CFX를 이용하여 초고압 차단기 아크 해석을 위한 기초적인 사항인 냉가스에서의 유동해석과 전계해석을 수행했다. 이러한 연구는 향후 GIS의 아크를 해석하기 위해 반드시 확보해야 하는 기술이다.

GIS내에서 이동하는 부분과 실제 계산에서 이동하는 부분은 정확히 반대이다. 실제 이동하는 부분이 복잡하기 때문에 계산에서는 형상이 간단한 부분을 이동하면서 계산을 수행한다. 본 연구에서는 물체의 이동을 모사하기 위하여 CFX 코드의 User-Subroutine을 사용하여 비정상상태에서 격자를 이동시키면서 해석했다. 현재 국내에서 GIS내의 물체이동을 위하여 주로 적용되고 있는 계산 셀(cell)의 속성을 변화시키는 방법(FLIC 또는 VOF)에 비하여 이동격자법은 해석에 적용하기 위한 과정은 복잡하지만 계산 결과는 셀의 속성 변화법보다 더 정확하다고 일반적으로 알려져 있다. 본 연구의 초기에 물체의 이동을 모사하기 위하여 CFX코드를 이용하여 셀의 속성을 변화시켰지만 계산의 수렴성과 정확도가 만족스럽지 못하여 연구를 진행하면서 이동격자법으로 해석방법으로 변경하였다. 이러한 이동격자법은 국내에 보급된 상용 CFD 코드인 STAR-CD에서 엔진 연소를 해석하기 위하여 적용하고 있으며 2002년 Fluent 최신 버전에서 적용이 가능하다고 홍보되고 있다.

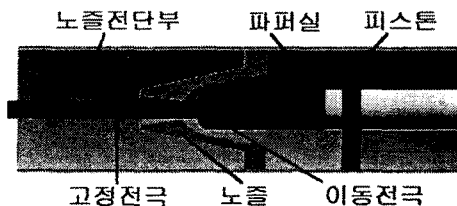


그림 1 해석용 GIS의 계략도

**2. 전산모사방법**

**2.1 유동장 모델링**

차단기내에서 유동은 그림 1에서 실린더가 이동하면서 SF<sub>6</sub> 가스를 압축하고 압축된 SF<sub>6</sub> 가스를 이용하여 소호하는 방식이다. 계산에서는 실제 동작원리와는 반대로 고정전극과 피스톤이 이동하면서 SF<sub>6</sub> 가스를 압축하

게 된다. 해석영역은 2차원 축대칭으로 한정하였으며, 전체 차단부중에서 유동의 변화가 차단성능에 영향을 미치는 부분만 계산영역으로 제한하였다. 결과에서 언급하겠지만 계산영역의 크기에 따라 차단부내에서 압력변동이 달라진다. 차단부 내에서 유동은 SF<sub>6</sub> 가스가 압력에 의하여 밀도가 변하는 압축성 유동이므로 냉가스 해석에서는 이상기체 상태 방정식을 적용하였으며, 해석 방법은 CFX 코드내의 압축성 유동해석식을 이용했으며 해석식은 일반적인 상용 CFD 코드에서 이용하는 해석식과 동일하다.

계산 시작 초기에 계산 영역 전체는 동일한 압력이 주어지며, 계산이 시작되면 피스톤의 이동에 의해 유동이 형성된다.

### 2.2 전기장 모델링

전계를 구하기 위하여 전위해석을 수행하고, 계산된 전위분포를 이용하여 계산한다. 전위해석에 이용된 식과 전위분포를 바탕으로 전계를 구하는 식이 아래에 나와 있다. 전위분포는 CFX코드의 User-Scalar를 이용하여 계산했다. User-Subroutine을 이용하여 전위계산을 위한 경계조건을 지정하고, 계산된 전위분포에서 전계를 구하였다.

$$\nabla \cdot (\nabla \epsilon \Phi) = 0, \quad E = -\nabla \Phi$$

여기서,  $\Phi$ 는 전위,  $E$ 는 전계를 나타낸다. 전위해석을 위한 경계조건은 고정전극에서 100V, 이동전극에서 0V이다. 이렇게 계산된 전계 분포는 일정한 관계식을 통하여 소전류 차단 예측이나 아크해석에 이용된다.

### 2.3 이동격자

계산 시작 시간으로부터 계산이 진행되면서 피스톤이 왼쪽으로 이동하고, 이에 따른 격자의 변형된 모습을 그림 2에서 확인할 수 있다.

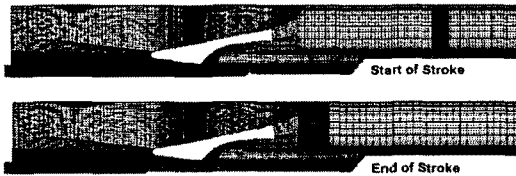


그림 2 계산 격자가 변형된 계략도

움직이는 경계를 포함한 유동 해석 방법은 전통적인 VOF(Volume Of Fluid)와 MAC(Marker And Cell), FLIC(FLuid In Cell) 등의 방법이 있으나 이들 방법은 고정된 격자를 이용함으로써 미세한 경계의 움직임에 대한 엄밀한 경계조건의 적용에 한계가 있으며, 이를 개선하기 위해 셀의 경계에 정확히 일치시켜서 경계를 이동시킬 경우에는 비정상 해석의 정밀도를 위해 요구되어지는 적절한 time step을 유지하기 위해서 너무 많은 수의 격자가 필요하게 되는 경우가 빈번하다. 본 연구에서는 이동격자법을 적용함으로써 경계조건을 엄밀히 부여했으며, 비교적 적은 수의 격자를 이용하여 time step 의존도가 없는 작은 시간 간격으로 해석을 수행하였다.

## 3. 결 과

### 3.1 난류모델에 의한 압력 변화

그림 3에서 난류모델에 따른 파퍼실 압력변화와 실험치를 비교하였다. 청색선이 2-Eqn. 난류모델이고 적색선이 1-Eqn. 난류모델인데 1-Eqn. 모델이 실험치인 녹색 점선과 더 근접함을 확인할 수 있다. 현재까지 수

행한 해석에서는 일반적으로 정확도가 떨어지는 것으로 알려진 1-Eqn. 모델이 더 실험치에 근접했으며 수렴성 또한 2-Eqn. 모델 보다 우수했다.

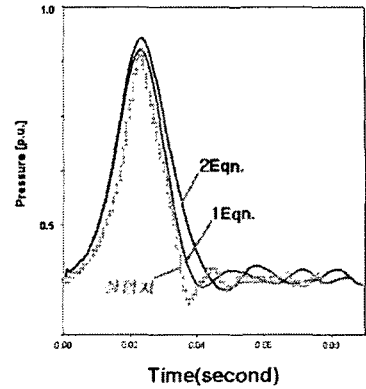


그림 3 난류모델에 따른 압력비교

### 3.2 스트로크에 따른 압력 비교

그림 4에는 스트로크에 따른 압력변화를 나타내었다. 흑색 선이 실험치이고 자색(CASE2)과 청색(CASE1) 계산 결과이다. 청색과 자색 각각에 대한 스트로크는 동일한 색으로 나타냈다. 스트로크에 따라 압력의 최고치와 최고치가 나타나는 시간이 달라지고 있음을 확인할 수 있다. 그림 3에서의 동일하게 최고치는 실험치보다 조금 높게 계산됨을 알 수 있다.

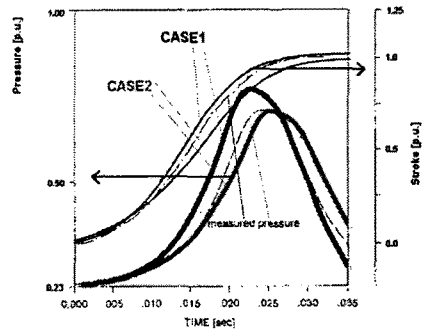


그림 4 스트로크에 따른 압력변화

### 3.3 GIS의 크기에 따른 최고 압력

그림 5에서 스트로크가 서로 다른 차단기에 대한 해석 결과를 비교하였다. A 차단기의 경우가 청색 그래프인데 스트로크의 이동속도가 빠르기 때문에 최고압이 B 차단기(자색)보다 높음을 알 수 있다.

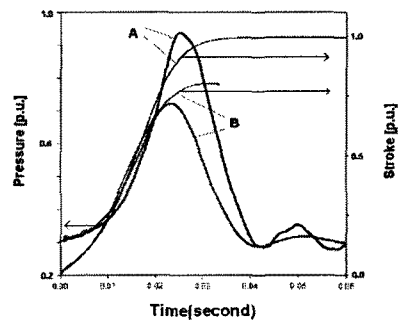


그림 5 차단기의 차단부 압력 특성

### 3.4 노즐 전단부 계산 체적에 따른 압력 특성

그림 6에 노즐 전단부(그림 1참조) 계산체적의 크기에 따른 파퍼실 압력 변화를 제시했다. 계산 체적이 증가한 경우가 자색인데 압력의 요동이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그림 3에서 0.04초 지점에서 계산 오차는 계산체적을 증가시킴으로서 줄일 수 있음을 알 수 있다. 향후 연구에서 계산영역을 선정할 경우에 충분히 심사숙고해야 할 것으로 판단된다.

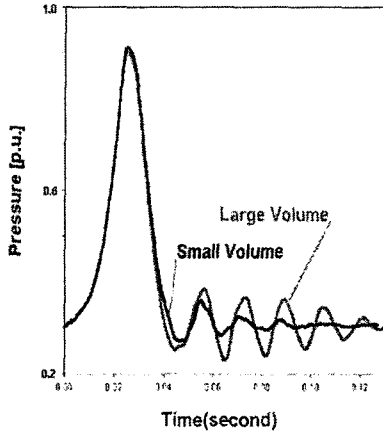


그림 6 노즐전단부 계산 체적에 따른 압력

### 3.5 GIS내에서 압력 차이

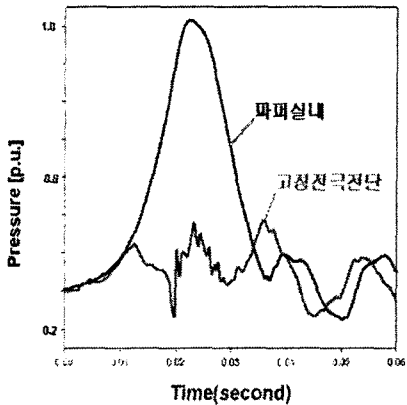


그림 7 GIS내 위치에 따른 압력 변화

동작중인 차단기의 파퍼실과 고정전극 전단에서의 압력변화가 그림 7에 나와 있다. 고정전단은 GIS의 차단 성공과 실패가 결정되는 중요한 영역이다. 이 영역에서 정확한 압력 예측은 향후 연구의 정확도에 많은 영향을 미친다. 파퍼실 내의 압력(파라색)이 상승하는 도중에 고정전극 전단에서 압력(보라색)은 강하되다가 압력이 진동함을 알 수 있다. 이러한 이유는 고정전극이 이동하는 부분이 노즐 내부로 이곳에서 초음속유동을 보이기 때문이다.

### 3.6 전위(V)와 전계(E)

해석된 전위와 전위분포를 바탕으로 구해진 전계를 그림 8에 제시하였다. 전위해석에 사용된 경계조건이 그림 8에 표시되어 있다. 전계분포 결과에서 고정전극의 끝단에서 급격한 상승을 나타냄을 볼 수 있다. 고정전극 끝에서 여러 가지 복잡한 전달현상과 전기 현상이 발생하

고 이 부분에서 일어나는 현상에 따라 차단 성공여부가 결정되기 때문에 향후 연구에서 집중적인 관심이 요구되는 영역이다.

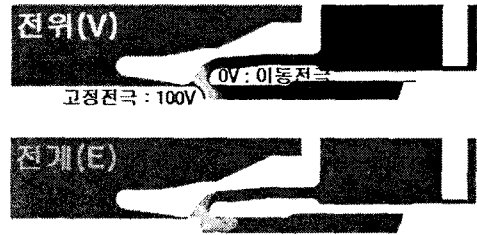


그림 8 전위분포(V)와 전계분포(E)

## 4. 결 론

GIS내에서 이동하는 피스톤과 전극을 이동격자법을 이용하여 성공적으로 모사했다. 이러한 이동격자법을 이용한 계산을 통하여 압력은 실험치와 5%내에서 정확하게 예측할 수 있었으며 스트로크의 형태에 따라 최고 압력의 위치와 값의 변화를 확인했다. 노즐 전단부 해석 체적에 따라 최고압의 진동 패턴이 변하기 때문에 계산 체적의 선정시 유의해야 함을 알 수 있었다. CFD 코드의 User-Scalar를 이용하여 전위해석을 수행하여 전계 분포를 구할 수 있었다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Ph. Riviere, J. Quantitative spectroscopy & Radia Transfer, Vol. 73, pp. 91-110, 2002.
- [2] X. D. Zhang, J. Y. Trepanier and R. Camarero, C Fluid Dyn., Vol. 2, pp. 41-64, 1994.
- [3] "초고압 전력기기 기초 설계기술 개발", 산업자원부, 2000.9.