

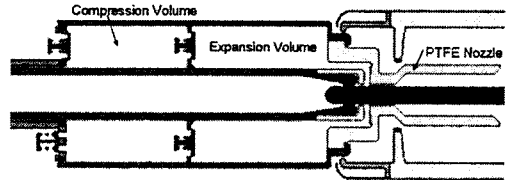
전력용 차단장치의 플라즈마 유동에 관한 전산해석

이중철¹, 김철수¹, 허중식², 김윤재³
¹국립원주대학, ²한국기기유회사시험연구원, ³성균관대학교

Computer Simulation of Plasma Flows in Switching Devices

Jong-Chul Lee¹, Chul-Soo Kim¹, Joong-Sik Heo², and Youn J. Kim³
 Wonju National College¹, Machinery and Petrochemical Research Institute², Sungkyunkwan University³

Abstract - The modelling of some different types of switchgears has been reported in the previous papers. This paper consists of two parts. The first part concerns the modelling and simulation of switching arcs with an auto-expansion circuit breaker as an example. The second part focuses on the simulation of the PTFE nozzle ablation effect with three different nozzle shapes. For circuit breakers, the modelling of moving contact and the choice of time steps are discussed before typical results are given and compared with available test result.



<그림 2> 초고압급 복합소호식의 개략도

1. 서 론

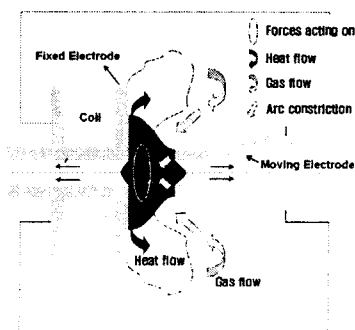
산업용 기기분야의 전원용 전기기기로 분류되어 있는 전력용 개폐장치 중 하나인 가스차단기(Gas Circuit Breaker, GCB)는 1970년대 이후의 지속적인 투자와 연구개발의 결과로 세계시장에서 상당한 경쟁력을 확보하고 있는 제품 중 하나지만, 도시의 과밀화와 디지털화로 인하여 전력공급의 신뢰도 향상과 도시 미관 개선 및 친환경적인 설비에 대한 요구의 증가로 지속적인 연구개발, 투자, 기술혁신을 요구하고 있다. 하지만 산업적인 특성상 기술 및 노동집약적인 산업으로 기술축적 기간이 길며, 대용량·초고압 제품일수록 대단위 설비투자 및 고도기술을 필요로 한다. 또한 투자회수 기간이 길고, 생산의 탄력성이 취약하며, 산업연관 효과가 크기 때문에 급변하는 세계시장에서의 경쟁력 유지 및 신사업 영역 확보에 많은 어려움이 따른다 [1]. ABB, SIEMENS, AREVA 등 해외의 선진업체에서는 높은 수준의 기술력을 바탕으로 상당한 수준의 콤팩트화·저조작력화를 달성한 것으로 판단되며, 이와 같은 가스절연 개폐장치(Gas Insulated Switchgear, GIS) 전체의 콤팩트화·저조작력화를 실현하기 위해서는 GIS의 핵심부품인 가스 차단부의 획기적인 기술발전이 선행되어야 하고, 이러한 기술발전은 각종 차단방식, 조작방식의 개발에 의한 것은 물론 근래의 눈부신 해석기술의 진보에 의한 점이 크다 [2].

본 논문에서는 두 가지 차단방식(배전급 복합소호식, 초고압급 복합소호식)의 차단과정에서 발생하는 대전류 아크현상과 CFD(Computational Fluid Dynamics) 코드를 이용한 해석결과를 기술하고자 한다. 일련의 과정을 통하여 개발된 모델링 방법은 막대한 투자비 및 운용비를 필요로 하는 실험적 연구를 효과적으로 보조하고, 새로운 차단방식의 설계개념을 세우는데 커다란 경제적·시간적 기여가 가능하.

2. 기초이론 및 차단원리

2.1 배전급 복합소호식

배전급 복합소호식은 구동메카니즘의 단순화 및 접점 용삭 방지, 대기압 수준의 SF₆ 가스압 사용을 위하여 전자식(rotary-arc) 소호방식과 열팽창식(thermal expansion) 소호방식을 합친 중첩 소호방식으로 다른 소호방법에 비해 차단전류의 증가에 따른 아크소호능력이 우수하며 가격경쟁력과 제작의 용이성 등을 갖춰 배전급 차단장치의 성능 향상에 이상적인 소호방식으로 인정되고 있다 [3]. 전체적인 동작 및 아크소호구조는 아래 그림 1과 같이 소호부 내에서 개리된 접점에 의해 아크가 발생되며, 아크에너지에 의하여 소호부 가스압력이 상승되고 전극에 구성된 유로를 통하여 가스 흐름이



<그림 1> 배전급 복합소호식의 개략도 및 차단원리

발생하여 전극 사이에 형성된 아크를 냉각시키게 된다. 이때 아크제어를 위하여 고정접점에 코일을 적용하여 자계를 형성함으로써 아크회전의 장점을 응용하여 아크를 축중심쪽으로 모아주는 역할을 할 수 있다.

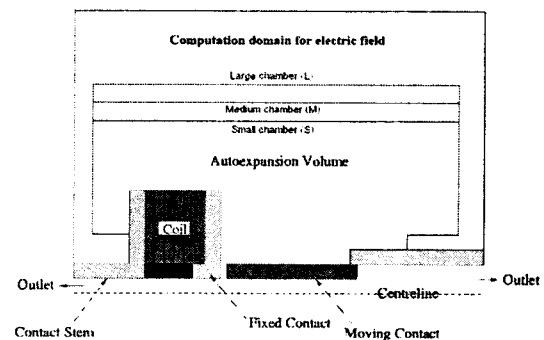
2.2 초고압급 복합소호식

초고압급 복합소호식은 가장 널리 사용되어 왔던 기계식 파퍼(puffer) 소호방식을 대체하고 파퍼 실린더의 기계적인 조작력 저감 및 시스템의 콤팩트화를 실현을 위하여 아크에너지에 의하여 증발되는 강화테프론(PTFE) 노즐의 용삭현상을 압력상승에 이용하여 상대적으로 작은 조작에너지로 더 큰 파퍼 실린더 압력상승을 유도하는 것으로 현재 모든 연구기관 및 메이커 업체에서 차세대 소호방식으로 인정하여 개발 및 신뢰성 확보에 박차를 가하고 있다 [4]. 그림 2는 초고압급 복합소호식의 개략도를 나타내고 있다. 소호부는 압축실(compression volume)과 팽창실(expansion chamber)로 분리되어 있고 두 챔버 사이의 압력에 의하여 가스흐름을 제어할 수 있는 체크밸브로 구성되어 있다. 접점분리에 의한 아크발생 후 초기단계에서는 압축실의 압력이 팽창실보다 높기 때문에 밸브가 열리고 가스유로가 형성되지만, 대전류 구간에 접어들면서 접점 사이의 아크에너지에 의한 PTFE 노즐에서 뜨거운 용삭가스가 발생하고 팽창실로 유입되면서 팽창실의 압력을 상승시킨다. 따라서 대전류 구간에서는 팽창실의 압력이 압축실의 압력보다 높기 때문에 체크밸브는 닫히게 된다. 상승된 팽창실의 압력은 전류영점 부근에서 아크를 냉각시킬 수 있는 가스흐름을 만들게 된다. 따라서 기존의 기계식 파퍼 소호방식보다 작은 조작력 및 챔버 크기로 발생된 아크를 소호시킬 수 있다.

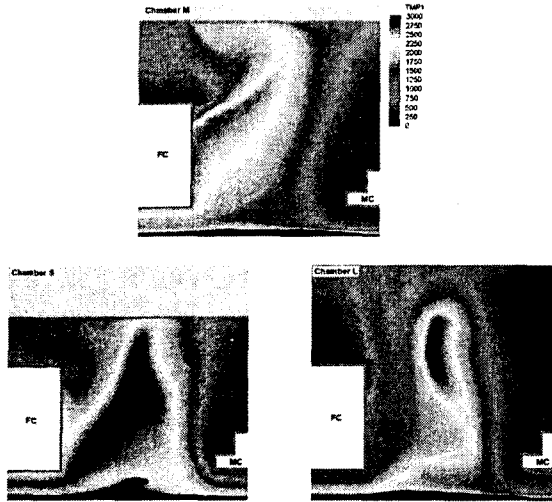
3. 수치해석방법 및 결과

3.1 배전급 복합소호식의 아크모델링 및 해석결과

배전급 복합소호식에서 발생하는 아크 플라즈마에 의한 열유동 특성을 해석하기 위해서는 가스의 질량, 운동량, 에너지 방정식과 전류의 연속방정식, 그리고 코일에 의한 자기장 계산을 위한 Maxwell 방정식 등을 결합(coupling)해야 하며, 이를 위한 보존형 지배방정식은 (1)과 같으며, 지배방정식에 필요한 변수에 따른 확산계수와 생성항 그리고 자세한 전자기 관련 식 등은 참고문헌 [5]를 참조하기 바란다.



<그림 3> 배전급 복합소호식의 해석모델 개략도



〈그림 4〉 두 번째 전류영점 직전의 온도분포 (3,000K 이하)

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

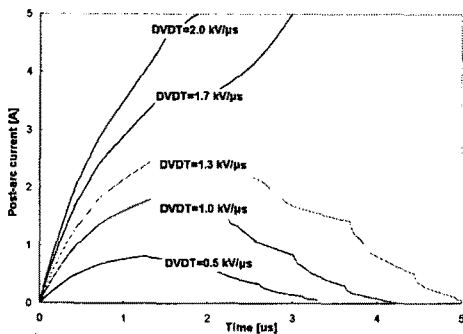
소호부 챔버 크기변화에 따른 대전류 아크특성과 성능변화를 예측하기 위하여 그림 3에 나타난 것과 같이 3가지 크기(L, M, S)를 설정하여 해석을 수행하였다. 해석결과와 검증에 위하여 제작한 실험용 챔버의 차단실험을 실시하여 계측한 아크전압을 해석을 통하여 구한 것과 비교하였다. 첫 번째 전류영점 전까지의 구간에서는 약 100[V], 두 번째 전류영점에서는 약 200[V]의 값을 나타내었으며 이는 실험결과와 잘 일치하고 있다. 또한 차단시 발생하는 급격한 아크전압의 증가를 나타내는 것으로부터 본 연구에서 구축한 모델링 방법의 타당성을 확인할 수 있다 [5]. 그림 4는 두 번째 전류영점 직전의 챔버 내부 온도를 나타내고 있다. SF₆ 가스의 물리적 특성상 3,000K 이상이 되면 전기전도도가 급격히 증가하고 그 이하 부근의 값에서 대류에너지 이송(convective energy transport)이 최대가 되기 때문에 전류영점 직전부터 열회복기간에 걸쳐 3,000K 이하의 온도를 유지할 수 있도록 가스흐름을 만들어야 소호력을 증가시킬 수 있다 [6]. 따라서 3가지 크기 중 챔버M이 가장 좋은 소호성능을 나타낼 것으로 예측할 수 있다.

그림 5는 3가지 크기의 챔버 중 소호성능이 가장 좋을 것으로 예측되는 챔버M의 과도회복전압상승률(RRRV) 영역 후 아크전류(post-arc current)를 나타내고 있다. 계산결과로부터 챔버M의 한계과도회복전압상승률은 약 1.5[kV/μs]임을 알 수 있으며, 이 값은 챔버를 설계하는데 유용한 정보로 사용될 수 있다.

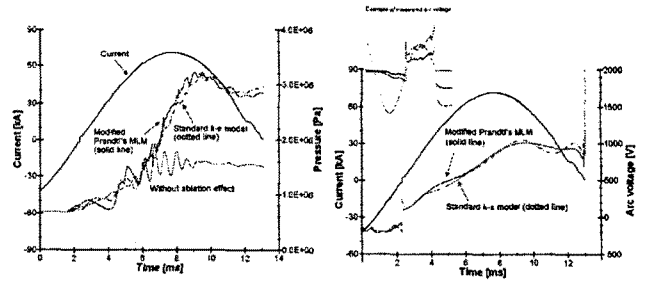
3.2 초고압급 복합소호식의 아크모델링 및 해석결과

초고압급 복합소호식에서 발생하는 아크 플라즈마에 의한 열유동 특성 해석 또한 전술한 배전급과 동일하지만 가장 큰 차이점은 PTFE 노즐 용삭현상에 관한 모델링이 추가적으로 검토되어야 한다. 노즐재료인 PTFE는 600K에서 증발하며 그 사이에 증발에너지(5.73×10⁴ [J/kg])를 아크로부터 빼앗는다. 또한 발생한 PTFE 용삭가스는 가스 흐름 속으로 유입되는데 3,400K에서 해리가 일어나고, 해리에너지를 아크로부터 빼앗는다. Ruchi와 Niemeyer [7]의 실험적 연구에 의하면 방출되는 PTFE 용삭가스의 온도는 3400K±200K라 보고되고 있다. 방출된 용삭가스는 주변의 SF₆가스와 대류와 확산에 의하여 혼합되게 되므로 이를 위한 질량농도방정식이 필요하다. 지배방정식 등의 자세한 내용은 참고문헌 [8]을 참조하기 바란다.

해석모델의 아크시간은 13.1 [ms]이며, 투입전류는 최대 50[kA_{rms}]이다. 전체 계산구간에서의 아크전류에 대한 아크전압과 팽창실 압력상승의 해석



〈그림 5〉 챔버M의 과도회복전압상승률에 따른 계산된 영점 후 아크전류



〈그림 6〉 전체차단과정에서 계산된 팽창실 압력상승(좌)과 아크전압(우)

결과를 그림 6에 나타하였다. 용삭현상을 고려하지 않고 계산한 경우를 보면, 전류영점 직전의 압력상승은 용삭현상을 고려한 경우에 비교하여 약 35% 정도 밖에 되지 않는 것을 확인할 수 있으며, 팽창실로 유입되는 용삭가스에 의한 압력상승이 매우 중요한 것을 알 수 있다. 노즐용삭 현상 등에 의하여 최대 전류값 이후에도 계속 압력상승이 일어나는 것을 잘 예측하고 있으며, 이후의 압력감소는 점점 사이의 아크 플라즈마를 냉각시키는 소호력을 발휘하는데 사용된다. 또한 우측의 아크전압의 결과를 보면 대전류 구간 동안 아크전압의 크기는 평균 800[V]를 나타내고 있으며, 전류영점 부근에서는 아크냉각에 의해 급상하는 현상을 잘 나타내고 있다. 또한 상부의 계측된 아크전압과도 정성적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 전류영점 직전의 팽창실(좌)과 두 점점 사이(우)에서의 온도분포이다. 팽창실의 온도는 1,700K 이하이며 아크를 냉각시키는데 사용되는 두 점점 사이로 빠져나가는 가스의 온도는 매우 낮음을 볼 수 있다. 이것으로부터 높은 소호력을 예측할 수 있으며, 만일 설계가 잘못된 경우라면 대전류 구간 동안 유입된 열가스가 기존의 냉각수와 원활한 혼합이 이루어지지 않아 팽창실 내부의 온도분포가 매우 불규칙할 것이고 점점 사이로 분사되는 가스의 온도 또한 높아질 것임을 쉽게 예상할 수 있다. 우측 그림은 점점 사이의 온도분포로서 팽창실에서 분사되는 소호력 높은 가스에 의한 효과적인 냉각에 의하여 아크의 직경이 매우 얇고 점점 부근의 온도가 낮아진 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 배전급 복합소호식과 초고압급 복합소호식의 차단과정에서 발생하는 대전류 아크현상을 CFD 코드를 이용한 해석결과를 이용하여 기술하였다. 대전류 영역에서 발생하는 두 점점 사이의 아크 플라즈마 운동특성과 소호부 압력상승에 의한 분사력(blowing force) 및 전류영점 부근에서 냉각되는 과정은 확인할 수 있었다. 또한 챔버 설계에 따른 소호력의 차이를 열유동특성 및 아크전압을 이용하여 시각화함으로써 차단현상에 관한 물리적 이해를 돕고 차단부 설계를 위한 기준(guideline)을 제시하는데 기여할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Garzon, R. D., "High voltage circuit breakers: Design and applications 2nd", Marcel Dekker, New York, 2002.
- [2] Schavemaker, P., "Digital testing of high-voltage SF₆ circuit breakers", Dissertation, Delft University of Technology, 2002.
- [3] Plessi, A., Niemeyer, L., and Pedonsin, F., "Research for medium-voltage SF₆ gas circuit breakers, ABB Review, Vol. 2, pp. 3-10, 1989.
- [4] 가스차단기의 차단기술동향, 日本電氣學會技術報告, 第993号, 2005.
- [5] Lee, J. C. and Kim, Y. J., "Numerical modeling of SF₆ thermal plasma generated during the switching process", *Thin Solid Films*, Volume 475, Issues 1-2, pp. 72-80, March 2005.
- [6] Sedlack, J., Vostracky, Z., Knobloch, H., Schramm, H., and Wiesinger, C., "Optimization of high-voltage self-blast interrupters by gas flow and electric field computations", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 18, No. 4, pp. 1228-1235, 2003.
- [7] Ruchi, C. B. and Niemeyer, L., "Ablation controlled arcs", *IEEE Trans. on Plasma Science*, Vol. PS-14, pp. 423-434, 1986.
- [8] Lee, J. C. and Kim, Y. J., "Effects of nozzle shape on the interruption performance of thermal puffer-type gas circuit breakers", *Vacuum*, Vol. 80, No. 6, pp. 599-603, 2006.



〈그림 7〉 전류영점 직전의 온도분포 (좌: 팽창실, 우: 점점 사이)