

CFD-CAD 통합해석을 이용한 초고압 가스차단기 설계 기술 개발

이종철* · 오일성* · 민길식** · 김윤제***

Development of Analysis Technique for a High Voltage Circuit Breaker Using the CFD-CAD Integration

J. C. Lee*, I. S. Oh*, K. S. Min** and Y. J. Kim***

Key Words : High Voltage Gas Circuit Breaker(초고압 가스차단기), CFD-CAD Integration(CFD-CAD 통합해석), Mesh Transformation Method(격자변환기법), Moving Boundary Condition(이동경계조건), Cut-Cell Method(분할격자기법)

Abstract

There are many difficult problems in analyzing the flow characteristics in a high voltage circuit breaker such as shock wave and complex geometries, which may be either static or in relative motion. Although a variety of mesh generation techniques are now available, the generation of meshes around complicated, multi-component geometries like a gas circuit breaker is still a tedious and difficult task for the computational fluid dynamics. This paper presents the computational method for analyzing the compressible flow fields in a high voltage gas circuit breaker using the Cartesian cut-cell method based on the CFD-CAD integration, which can achieve the accurate representation of the geometry designed by a CAD tools. The technique is frequently satisfied, and it will be almost universally so in the future, as the CFD-CAD traffic increases.

1. 서 론

현재 초고압급(high voltage) 가스 차단기(Gas Circuit Breaker, GCB)에 널리 이용되고 있는 파퍼(puffer)식 가스 차단기는 실린더 내부 피스톤에 의해 압축되는 SF₆ 가스의 증가된 압력을 유효하게 이용하여, 전류차단 시 발생하는 아크를 소호(quenching)시키는 원리로 작동된다[1].

차단특성에 영향을 미치는 것은 소호부 내부의 밀도 및 압력분포인데, 소호부 내에서 일어나는 아크 소호 메커니즘(mechanism)은 아크 자체와 충격파, 비정상성, 3차원성 등 가스유동의 상호작용에 의해 매우 복잡하기 때문에 실험적 연구는 용이하지 않다. 최근 들어 수치기법, 격자생성기법, 난류모델, 경계조건의 적용, 전처리 및 후처리 기

법, 그리고 컴퓨터 기술의 발달로 인하여, 여러 산업체 분야에서 설계에 유용한 도구로 자리잡은 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)[2]은 시대의 흐름에 맞추어 전기, 전자기기 분야에도 활발히 진행 중에 있다. 특히 전력기기 분야에서의 유동해석[3]은 가스차단기의 설계, 성능개선 및 검증을 위해서 전계해석과 더불어 매우 중요하다. 이를 위해선 차단과정을 원활히 모사할 수 있는 수치적 해석이 필요한데, 차단부 내에는 전극(electrode)의 상대운동 및 노즐 부분을 포함하는 복잡한 형상이 존재하며, 이로 인한 초음속(supersonic) 유동이 발생하기 때문에 실제 차단과정을 모사하기는 시간적, 경제적으로 쉽지 않은 실정이다. 따라서 일반 곡선 좌표계(body-fitted coordinate)를 사용하여 격자를 생성하는 방법보다는 CAD(Computer aided design)를 이용하여 해석 영역 및 물체를 정의하고 이를 CFD 와 원활하게 연결(interface)시킬 수 있는 기술의 고안이 필요하다.

* LG 산전(주) 전력연구소

** LG 산전(주) 초고압 설계팀

*** 성균관대학교 기계공학부

본 연구에서는 유동해석에 대한 필요성과 격자 생성 및 모델링 작업에 많은 시간과 노력이 요구되는 난점 보완을 모두 충족시킴으로써, 제품 성능의 정확한 예측과 최적화 설계를 실현시킬 수 있는 직교 좌표계(Cartesian coordinate)에서의 분할격자기법(Cartesian cut-cell method)[4]을 이용한 CFD-CAD 통합해석(CFD-CAD integration) 기술을 개발하였다. 현재 주류를 이루고 있는 방법인 일반 곡선 좌표계(body-fitted coordinate)를 이용한 계산방법은 격자생성 등 모델링 작업에 과도한 시간과 노력을 요구하며, 해의 수렴성 문제도 포함하고 있다. 본 연구에서는 이러한 모델링 작업을 해의 수렴성이 보장되는 직교 좌표계에 적용함으로써 보다 쉽게 접근할 수 있었으며, 객체지향적 3 차원 CAD 가 가능한 Pro-Engineer 를 사용하여 주요 설계 인자를 정확하면서도 쉽게 변경하여 해석함으로써 차단 성능 평가와 설계 변경 등을 용이하게 하였다.

CAD S/W 를 사용하여 모델링한 해석영역내 물체를 CFD 와 연결시키기 위해서 분할격자기법을 제공하는 상용 CFD 프로그램인 PHOENICS-VR(virtual reality)을 사용하였고[5], 스트로크(stroke) 파형에 맞는 격자변환기법(mesh transformation method)[6]이 적용된 차단부의 이동 및 SF₆ 가스의 물성치를 적용하기 위하여 사용자 프로그램(user subroutine)을 작성하여 수치계산에 추가하여 유동장을 계산할 수 있도록 프로그래밍 하였다.

2. 수치해석

2.1 가스차단기의 해석내용 및 지배방정식

실제 초고압 차단기의 성능해석을 위해서는 노즐, 전극 등의 복잡한 형상, 이동경계, 충격파 등의 유동적 문제 뿐만 아니라, Table 1 에 나타낸 바와 같이 대전류 차단시 발생하는 아크에 의한 영향을 고려할 수 있는 복사를 고려한 SF₆ 가스의 아크모델링, 전계강도(electric strength)를 구하여 절연내력을 계산하기 위한 전계해석을 모두 계산에 반영할 수 있는 프로그래밍이 필요하다.

본 연구는 소전류 차단성능 평가를 위한 유동 해석을 수행하고자 한다. 소호부는 축대칭 구조로 되어 있어 2차원 축대칭 해석이 가능하고, 계산에 사용된 지배방정식을 일반적인 보존형 Navier-Stokes 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

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

Table 1 Analysis contents for a gas circuit breaker

해석 기법	계산 내용
SF ₆ 가스의 물성치 해석	온도, 압력에 따른 가스의 열역학적 물성치 및 복사 에너지 계산
아크 모델링	대전류 영역의 아크현상 및 전류영점 영역의 아크현상 해석
전계해석	절연설계 및 절연회복특성을 위한 전계해석
유동해석	복잡한 형상 및 이동경계를 고려한 초음속 유동장 해석

여기서 Γ_ϕ 는 변수 ϕ 에 대한 유효확산계수이며, S_ϕ 는 생성항을 나타내고 있다. 각 유동변수에 따른 유효확산계수와 생성항은 참고문헌[7]을 참고하기 바란다.

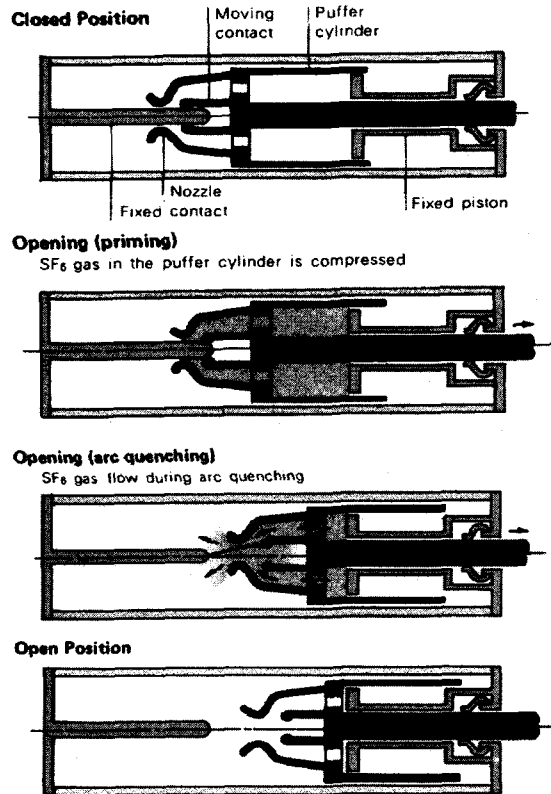


Fig. 1 Operation mechanism of a puffer-type GCB (Fuji Electric, 1998)

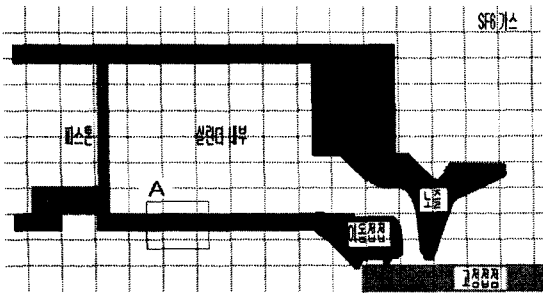


Fig. 2 Calculation domain of a gas circuit breaker

2.2 경계조건

차단기의 정격 전압 및 정격 전류에 따라서 차단부의 형상, 초기 충전 압력 및 스트로크 곡선 등이 약간씩 다르며, 해석 시에는 이들을 모두 고려하여 해석을 진행한다. 유동해석은 작동유체인 SF₆ 가스 온도범위를 이상기체로 간주하여 이상기체 상태방정식을 적용하였으며, 이 때에 사용된 가스 물성치는 기준온도 288 K 에서 정적비열(C_v) 583.5 J/kg·K, 정압비열(C_p) 640.4 J/kg·K, 기체상수(R) 56.95 J/kg·K, 비열비(γ) 1.09, 음속(c) 134.2 m/s 이다. 초기조건은 상온 하에서 정지해 있으며, 스트로크 곡선을 따라 44.6ms 동안 가동부(피스톤과 고정아크접점)를 이동시켜 계산을 수행하였다. 총 스트로크 길이에 대한 시간구간은 700 회로 나누었으며, 각각의 시간구간마다 100 회 또는 500 회(이동시)씩 반복하여 COMPAQ SP750 장비(Intel P3 Xeon 733MHz of 2CPU, 1GB memory)에서 계산을 수행하였다. 피스톤의 압축으로 인하여 발생하는 유동은 전극이 분리됨에 따라 노즐을 통하여 출구로 빠져나가게 된다. 출구에는 압력조건과 종속변수의 구배가 0 인 조건(Neumann condition)을 사용하였다. 벽경계면에서의 속도 성분은 모두 점착조건(no-slip condition)을 사용하였다.

2.3 분할격자기법과 격자변환기법

Fig. 1 은 파퍼형 가스차단기의 차단원리를 간략히 설명하고 있다. 해석시에는 격자생성 등의 문제로 인하여 실제적인 작동원리와는 고정접점과 피스톤이 왼쪽 방향으로 이동을 하여 파퍼 실린더 내 SF₆ 가스를 압축하는 것으로 모델링 하였다.

본 연구에서 사용된 해석영역은 Fig. 2 와 같다. 이동부를 제외한 다른 형상은 CAD 프로그램에서 디자인하여 직각좌표계에 대하여 생성한 기본격자(background mesh)에 삽입하였고, A 부분과 같이 동일 격자에 유체부와 고체부가 공존하는 셀에 대한 계산은 분할격자기법(cut cell method)을 이용하여 계산하였다.

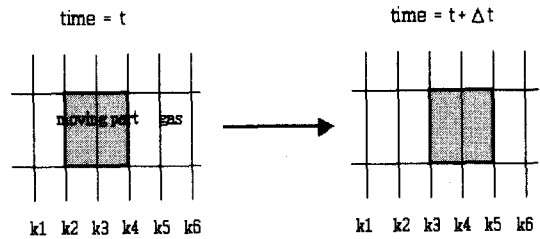


Fig. 3 Movement simulation of moving part in fixed grid using the mesh transformation method

이와 같은 방법은 기존의 정렬/비정렬 격자 방식에 비하여 매우 간단히 격자를 생성할 수 있는 경제적, 시간적 장점을 가지고 있으며, 계속 연구, 발전되고 있는 수치해석 기법이다.

차단부내 피스톤과 고정접점의 상대운동을 모사하기 위하여 Fig. 3 과 같이 시간에 대해서 고정된 계산격자 안에서 셀의 물질특성을 변화시키는 기법을 사용하였다. 피스톤 및 고정접점은 스트로크(stroke) 파형에 맞는 격자변환기법이 적용된 차단부의 이동을 적용하기 위하여 작성한 사용자 프로그램에서 영역을 지정하여 유동장을 계산할 수 있도록 프로그래밍 하였다.

이 방법은 스트로크에 따른 각 스텝의 이동거리를 계산하여 고체영역인 피스톤과 고정접점의 셀 위치를 파악하며, 이동이 일어나는 순간에는 진행방향 전방의 유체격자는 고체격자로 변환되고, 후방의 고체격자는 유체격자로 바뀌면서 피스톤과 고정접점의 운동을 모의하는 것이다. 따라서 정렬격자(structured mesh)에서 이동부 모의를 위하여 자주 사용되는 이동격자법(sliding mesh method), Chimera 법(composite overlapping block structure approaches)[8], FAME 법(flexible mesh embedding techniques)[9], 그리고 비정렬격자(unstructured mesh)에서 이동부 모의시 발생하는 복잡한 보간기법의 문제점을 감소시킬 수 있다.

3. 결과 및 고찰

차단부 모델에 대한 수치해석을 수행하여 피스톤 전면과 고정전극 선단에서의 압력변화를 Figs. 4 와 5 에 백분율비로 비교하였다.

Fig. 4 는 본 연구의 해석 결과 얻어진 피스톤 전면에서의 압력을 실험 결과와 임의 형상의 격자 사용이 가능하기 때문에 복잡한 차단부 형상 표현이 쉬우며, 충격과 발생시에도 정확한 해를 구할 수 있는 것으로 알려져 있는 FVFLIC(Finite Volume Fluid in Cell)법[10]을 사용하여 계산한 결과를 비

교한 것이다.

피스톤 전면에서의 압력은 차단성능에 큰 영향을 주며, 필요한 차단력을 얻기 위해서는 충분한 압력상승이 확보되어야 한다. 스트로크 시작과 함께 피스톤의 압축으로 인하여 압력이 증가하기 시작하며, 전극이 완전히 노즐목(throat)을 빠져 나감에도 불구하고 파퍼실린더 내부의 압력상승이 꾸준히 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이는 양쪽 노즐 부분에서 발생된 충격파 때문이며, 압력상승은 스트로크가 끝나는 지점까지 지속되다가, 고정접점과 노즐 목 사이에 충분한 공간이 확보되고 피스톤의 이동이 멈추는 시간부터 압력은 다시 초기 충전 압력으로 감소하게 된다.

본 연구의 결과를 비교하면, 전체적인 압력상승 경향은 실험결과, FLIC 법을 이용한 결과와 비슷하고, 최대 스트로크 이후의 경향은 FLIC 법보다 예측을 잘하고 있음을 볼 수 있다. 하지만 압력상승 후 충격파에 의해 압력이 떨어지는 시간 및 최대압력 상승치에는 약간의 차이가 있다. 이는 충격파에 대한 영향을 정확히 해석하지 못한 것으로 파악된다.

차단부를 구성하고 있는 부분 중에서 고정 아크 접점 부근은 극간 절연 회복 특성이 가장 취약하기 때문에, 이 부분에 대한 정확한 유동해석이 이루어져야 한다. 하지만 이 부분은 이동경계부분이며, 노즐목 부근에서 형성된 충격파의 영향에 의해 압력 및 밀도변화가 심하기 때문에 정확한 해석결과를 얻기 어렵다. 여기서는 고정전극 중심부에 압력센서를 설치하여 이 부분에서의 압력측정 결과를 해석결과와 Fig. 5에 비교하였다.

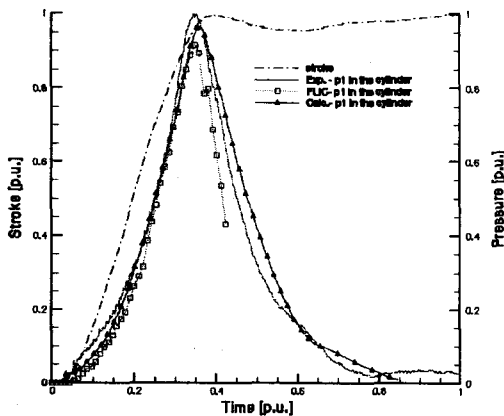


Fig. 4 Comparison of pressure in front of piston

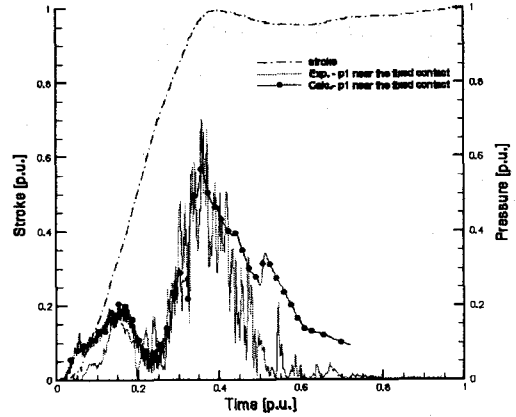


Fig. 5 Comparison of pressure in the center of stationary contact

본 연구의 고정전극 선단 부근의 결과를 살펴보면, 정량적으로 정확히 예측하지 못하고 있지만 정성적으로 매우 일치하며, 기존의 다른 수치해법보다 정확한 과도특성을 예측하고 있다. 이는 격자생성과 이동격자에서 오는 오차를 줄인 본 연구 기법의 타당성을 입증한다고 볼 수 있다. 하지만 보다 정확한 예측을 위하여 충격파 예측을 원활히 수행할 수 있는 안정성 있는 수치기법 및 고정접점의 곡면부를 이동시킬 수 있는 보다 세밀한 분할격자기법에 관한 연구가 필요하다.

Fig. 6은 시간에 따른 마하수 분포를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 피스톤과 실린더의 상대운동에 따른 압축된 가스에 의해 유동이 형성되며, 실린더에서 나온 유동이 좌측 출구 및 우측 노즐로 배출되면서 양측의 노즐목에서 최대속도가 200m/s 이상이 되는 초음속 유동이 가속되고 있다. 노즐목의 하류단 부근에서 형성된 충격파로부터 목에서 초경유동이 발생함을 알 수 있으며, 발생한 충격파의 형태는 중심축에서 수직충격파의 형태이지만, 벽 근처에서는 경사충격파의 형태로, 내부 유동에서 자주 관찰되는 λ 형 충격파 형태를 나타내고 있다.

Fig. 7은 시간에 따른 압력 분포를 나타내고 있다. 피스톤 이동에 따른 압력 상승과 압축된 가스가 왼쪽에서 오른쪽 노즐방향으로 흘러가고 있는 현상을 잘 나타내고 있다. 충격파가 발생한 위치 및 시간에 따라서 실린더 내의 최대압력 상승치 및 압력상승 시간이 달라지기 때문에, 얻어진 결과를 이용하여 효과적인 차단특성을 나타낼 수 있는 노즐의 직경, 노즐목의 길이, 노즐 확대각 등 노즐의 기하학적 설계에 반영할 수 있다.

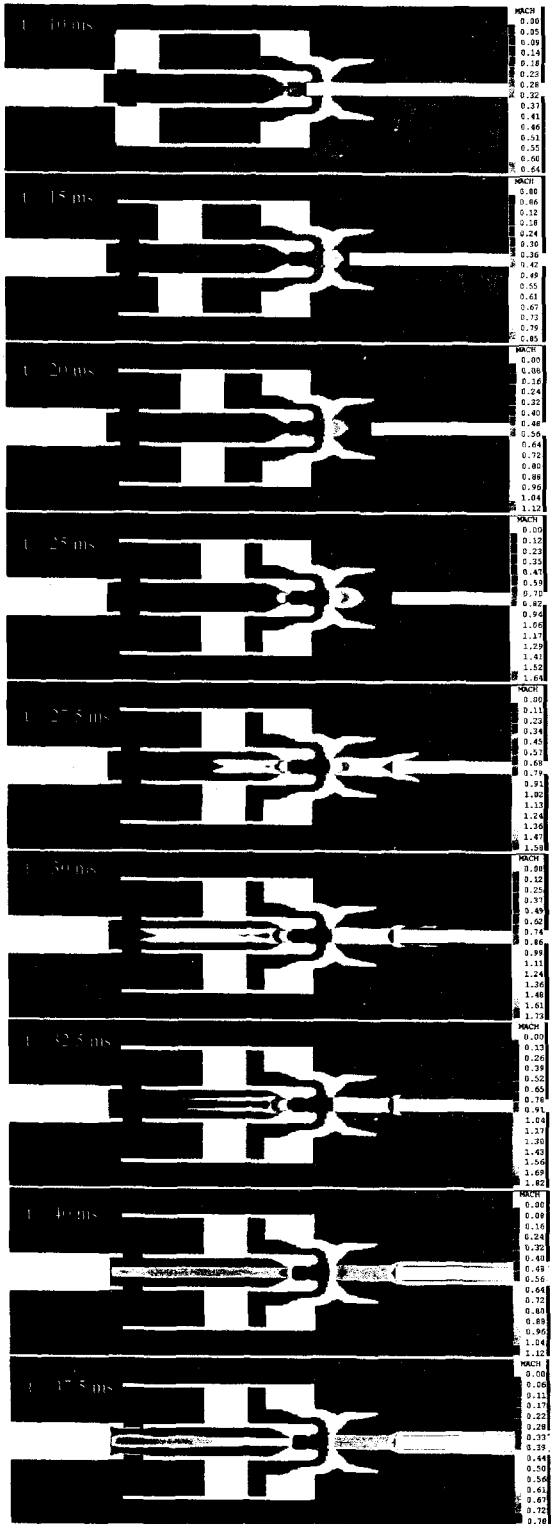


Fig. 6 Mach number distribution at each time step

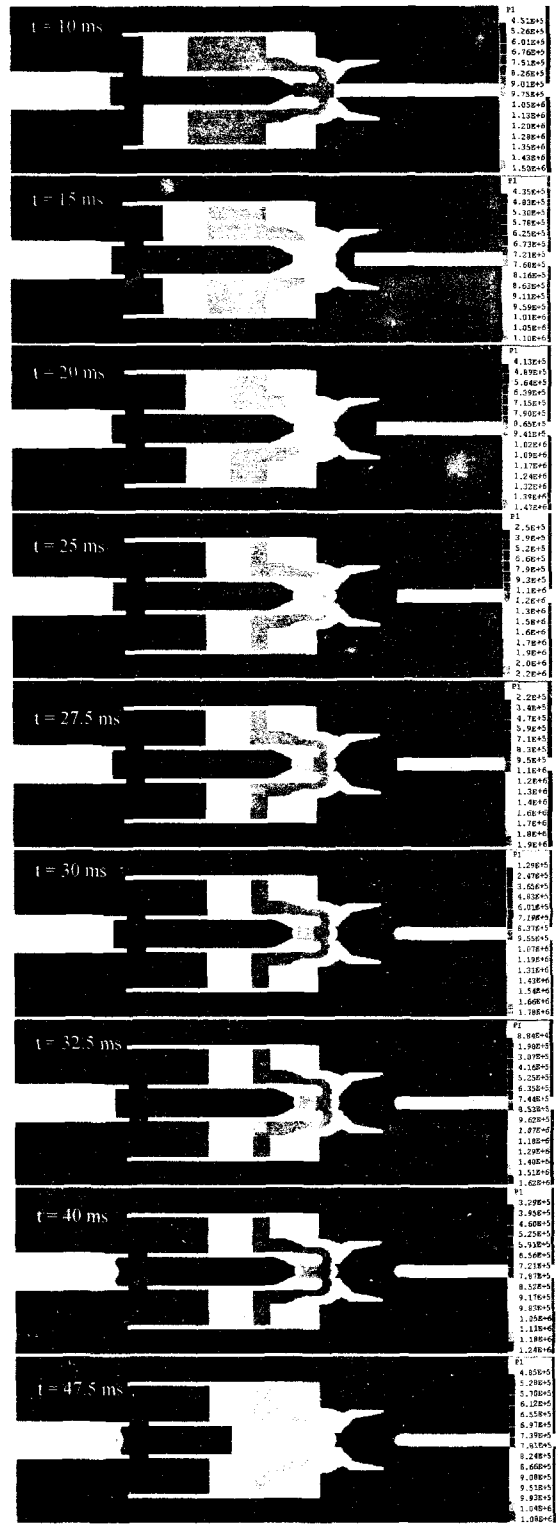


Fig. 7 Pressure distribution at each time step

4. 결론

본 연구에서는 복잡한 형상으로 구성되어 있는 가스차단기의 설계, 성능개선 및 검증을 위해서 전개해석과 더불어 매우 중요시 되고 있는 유동해석을 원활히 수행하며, 이를 설계에 즉시 반영할 수 있도록 CFD-CAD 통합설계 기술을 개발하였다.

이를 위하여 분할격자기법과 격자변환기법을 사용하여 직교 좌표계(Cartesian coordinate)에 적용함으로써 CAD S/W 와 CFD 를 원활히 상호연결시킬 수 있도록 하였으며, 주요 설계 인자를 정확하면서도 쉽게 변경하여 해석함으로써 차단 성능평가와 설계 변경 등을 용이하게 하였다.

이에 대한 검증을 위하여 파퍼식 가스차단기 내부의 아크를 고려하지 않는 냉가스 유동 특성 해석을 수행하였고, 실린더 내의 압력 및 고정아크접점 선단에서의 압력을 실험결과와 비교하였다. 실린더 내의 최대압력 상승치 및 최대압력상승 시간은 실험결과와 잘 일치하였으며, 고정아크접점에서의 압력도 기존의 다른 기법보다 우수한 결과를 나타내었다. 하지만 초고압 차단기 내부유동은 충격파, 비정상성, 3차원성 등 매우 복잡한 양상을 나타내기 때문에, 보다 정확한 해석을 위해서는 이를 적절히 모사하기 위한 압축성 유동해석 기법 및 난류모델의 개발 등이 요구된다. 또한 실제 대전류 차단특성을 평가하기 위하여 아크 및 전자력, 그리고 복사열전달을 고려한 연구가 계속 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Flurschein, C. H., 1982, "Power Circuit Breaker Theory and Design", *IEE Power Eng. Series 1*.
- (2) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", *Hemisphere*, Washington, D. C.
- (3) 이종철, 이방욱, 오일성, 2001, "PHOENICS 를 이용한 자력팽창 소호부 내 아크 유동해석", *대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회*, pp. 44-46.
- (4) Yang, G., Causon, D., Ingram, D., Saunders, R., and Batten, P., 1997, "A Cartesian Cut Cell Method for Compressible Flows-part B: Moving Body Problems", *Aeronautical Journal*, Vol. 101, No. 1001, pp. 57-65.
- (5) Spalding, B., 1998, "PHOENICS Encyclopedia, article on CFD to SFT, The Status and Future of CFD".
- (6) Yang, G., Causon, D., Ingram, D., 2000, "Calculation of Compressible Flows about Complex Moving Geometries Using a Three-Dimensional Cartesian Cut Cell Method", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 33, No. 8, pp. 1121-1151.

- (7) 이종철, 오일성, 김윤제, 2001, "초고압 가스차단기 내부의 압축성 유동장 해석", *대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 E*, pp. 305-310.
- (8) 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.
- (9) Albone, C. M., 1992, "Embedded Meshes of Controllable Quality Synthesized from Elementary Geometric Features", *AIAA Paper*, No. 92-0662.
- (10) 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.