

CFD-CAD 통합해석을 이용한 초고압 차단기 내부의 냉가스 유동해석 프로그램 개발

論 文

51B-5-4

Development of a CFD Program for Cold Gas Flow Analysis in a High Voltage Circuit Breaker Using CFD-CAD Integration

李 鍾 哲* · 安 熙 燮** · 吳 一 成*** · 崔 鍾 雄§
(Jong-Chul Lee · Heui-Sub Ahn · Il-Sung Oh · Jong-Woong Choe)

Abstract - It is important to develop new effective technologies to increase the interruption capacity and to reduce the size of a GCB(Gas Circuit Breakers). Major design parameters such as nozzle geometries and interrupting chamber dimensions affect the cooling of the arc and the breaking performance. But it is not easy to test real GCB model in practice as in theory. Therefore, a simulation tool based on a computational fluid dynamics(CFD) algorithm has been developed to facilitate an optimization of the interrupter. Special attention has been paid to the supersonic flow phenomena between contacts and the observation of hat-gas flow for estimating the breaking performance. However, there are many difficult problems in calculating the flow characteristics in a GCB such as shock wave and complex geometries, which may be either static or in relative motion. Although a number of mesh generation techniques are now available, the generation of meshes around complicated, multi-component geometries like a GCB is still a tedious and difficult task for the computational fluid dynamics. This paper presents the CFD program using CFD-CAD integration technique based on Cartesian cut-cell method, which could reduce researcher's efforts to generate the mesh and achieve the accurate representation of the geometry designed by a CAD tools.

Key Words: GCB(Gas Circuit Breakers), CFD-CAD integration, mesh transformation method, moving boundary condition, cut-cell method

1. 서 론

컴퓨터 기술과 수치기법의 발달로 인하여 공학분야는 물론 과학 분야에서도 유용한 도구로 인정되고 있는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)[1]은 시대의 흐름에 맞추어 더욱 복잡한 현상 및 형상을 다루어야 하는 전기, 전자기기 분야에서도 활발한 연구가 진행 중에 있다.

그 중 전력기기 분야에서의 유동해석은 가스차단기의 개발, 성능개선 및 검증에 위해서 전자계해석과 더불어 매우 중요하다[2]. 하지만 라플라스나 포와송의 식 형태를 계산하는 전자계해석과는 달리 유동해석에서는 유체유동에 의해 발생하는 비선형항이 포함된 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 하기 때문에 간단한 형상에 대한 유동계산조차 정확한 결과를 얻기는 어렵다. 더욱이 가스차단기 내부의 유동해석을 위해서는 기본적으로 두 접점의 상대운동 및 노즐 부분을 포함하는 복잡한 형상을 원활한 구현해야 하며, 노즐 부근 접점 사이에서 발생하는 충격파 및 초음속(supersonic) 유동을 정확히 예측해야 하기 때문에 단락시 발생하는 아킹현상 모의를

포함하지 않는 냉가스 유동해석조차 계산이 쉽지 않은 문제이다. 또한 노즐 및 실린더 등의 유동장 내부에 존재하는 임의 형상의 고체부는 기존의 격자생성 방법인 일반곡선좌표계(body-fitted coordinate)를 사용하여 정확히 모델링 하기에는 연구자의 과도한 시간과 노력을 요구하여 격자생성 작업 자체만으로도 커다란 부담이 되는 것이 사실이다. 이러한 복잡한 형상을 가진 유동장에 대한 계산을 위해서 CAD(Computer Aided Design)를 이용하여 해석 영역 및 물체를 정의하고, 이를 CFD와 원활하게 연결(interface)시킬 수 있는 기술이 고안되었으며, 더욱 넓은 범위로 해석 영역이 확장되고 있는 추세이다[3].

본 연구에서는 가스차단기의 개발 및 성능개선을 위한 유동해석에 대한 필요성과 격자 생성 및 모델링 작업에 많은 시간과 노력이 요구되는 난점 보완을 모두 충족시킴으로써, 제품 성능의 정확한 예측과 최적화 설계를 보다 용이하게 실현시킬 수 있는 유동해석 프로그램을 개발하고자 한다. 이를 위하여 직교 좌표계(Cartesian coordinate)에서의 분할 격자 기법(Cartesian cut-cell method)[4]을 이용한 CFD-CAD 통합해석(CFD-CAD integration) 기술을 개발하였다. 현재 주류를 이루고 있는 방법인 일반 곡선 좌표계를 이용한 계산 방법은 격자생성 등 모델링 작업에 과도한 시간과 노력을 요구하며, 해의 수렴성 문제도 포함하고 있다. 따라서 이러한 모델링 작업을 해의 수렴성이 보장되는 직교 좌표계에 적용함으로써 보다 쉽게 접근할 수 있었으며, 객체지향적 3차원 CAD가 가능한 Pro-Engineer를 사용하여 주요 설계 인자를

* 正 會 員 : LG産電(주) 電力研究所 先任研究員

** 正 會 員 : LG産電(주) 電力研究所 主任研究員

*** 正 會 員 : LG産電(주) 電力研究所 責任研究員

§ 正 會 員 : LG産電(주) 電力研究所 研究所長

接受日字 : 2002年 1月 15日

最終完了 : 2002年 3月 21日

정확하면서도 쉽게 변경하여 해석함으로써 설계 변경 및 차단성능평가로의 적용 등이 용이하게 하였다. 유동해석을 위한 주프로그램(main-program)으로는 CAD S/W로 모델링한 해석영역내 물체를 CFD와 연결시키기 위해서 분할격자기법을 제공하는 상용 CFD 프로그램인 PHOENICS를 사용하였고[5], 스트로크(stroke) 파형에 맞는 격자변환기법(mesh transformation method)[6]이 적용된 차단부의 이동 및 SF6 가스의 물성치를 적용하기 위하여 보조 프로그램(sub-program)을 작성하여 수치계산에 추가하여 유동장을 계산할 수 있도록 프로그래밍 하였다.

2. 가스차단기의 최적설계기술과 유동해석

가스차단기 설계에 유동해석 기술이 응용되는 것은 크게 아킹현상의 고려 유무에 따라 열가스해석과 냉가스해석으로 나뉜다. 이에 대한 결과는 진상소전류 차단성능, 근거리선로 고장에 대한 차단성능, 단자단락고장에 대한 차단성능을 예측하여 제품의 경제성과 신뢰성을 확보하는 것을 최종 목표로 한다.

2.1 진상소전류 차단 예측에의 응용

진상소전류 차단성능은 극간의 절연회복능력과 밀접한 관계가 있으며, 극간의 절연회복능력은 가스밀도와 전계강도에 의해 판단될 수 있다[7]. 차단성능확보를 위해 증가시킨 실린더 내부의 과도한 압력상승은 접점 사이에 발생하는 충격파에 의한 심한 압력 변동을 유발한다. 이러한 압력변동이 밀도 저하로 인한 소전류 차단성능을 악화시킨다고 알려져 있으며, 이를 위해서는 접점 사이의 압력 변동이 억제될 수 있도록 유동해석을 통해서 소호부 형상의 최적설계가 이루어져야 한다.

2.2 근거리선로고장에 대한 차단 예측에의 응용

근거리선로고장(SLF; Short Line Fault)에 의한 고장전류를 차단한 순간(전류영점 후 수 μs 이내), 극간에 열가스가 충전된 상태에서 매우 높은 회복전압상승률이 인가되므로, 실린더 압력을 높여 아크로 분사되는 가스유속을 높이는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서는 아크에너지가 실린더 압력상승에 미치는 영향을 예측하는 것이 중요하며, 타당성 있는 유동해석을 위해서 아크모델의 개발이 선행되어야 한다.

2.3 단자단락고장에 대한 차단 예측에의 응용

단자단락고장(BTF; Bus Terminal Fault)에 대한 차단성능을 확보하기 위해서는 차단기가 큰 고장전류를 차단한 후(전류영점 후 수 μs 이후) 고온가스가 아직 차단부내에 머물고 있는 상태에서 과도회복전압이 차단기 극간에 인가되기 때문에 접점 사이에서 발생한 아크에너지 냉각 능력을 극대화하여 절연회복특성을 향상시켜야 한다. 이를 위해서는 소호부에서 발생한 열가스가 배출구를 통해 효과적으로 빠져나갈 수 있도록 설계되어야 하며, 유동해석을 통해서 파악할 수 있

는 기술이 확보되어야 한다.

3. 수치해석

3.1 지배방정식

본 연구에서는 아킹현상 모의를 포함하지 않는 냉가스 유동해석을 수행하고자 한다. 비정상 압축성 난류유동에 대한 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 그리고 k- ϵ 난류 모델을 사용할 때의 지배방정식은 다음과 같다[8].

유동방정식

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

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

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

여기서,

$$h = C_p T + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = -(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$q_j = -\left(\frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$S_{u_i} = -\frac{2}{3}(\mu + \mu_t) \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

$$S_h = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} u_i u_i \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_i \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_i \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (8)$$

난류모델

난류에 대한 미지의 correlation항을 결정하기 위하여 k- ϵ 난류모델을 사용하였으며, 유동방정식 (1)~(8)에 나타나는 와점성계수(μ_t)는 난류 특성길이 척도($k^{3/2}/\epsilon$)와 난류 특성속도 척도($k^{1/2}$)에 의하여 다음 식으로 표현된다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

여기서, 난류 운동에너지(k)와 난류 운동에너지 소산율(ϵ)은 다음 난류 수송방정식으로부터 얻어진다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \mu_t G - \rho \epsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \frac{\epsilon}{k}(C_1 \mu_t G - C_2 \rho \epsilon) \quad (11)$$

여기서, 난류생성항 $\mu_t G$ 는 다음과 같다.

$$\mu_t G = \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (12)$$

식에 사용된 난류모델 상수들은 Table 1에 수록하였다[9].

표 1 난류모델상수

Table 1 Experimental constants for turbulent modelling

C_1	C_2	C_μ	σ_k	σ_ϵ	σ_t
1.45	1.92	0.09	1.0	1.3	0.9

3.2 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/kgK], 정압비열(c_p) 640.4 [J/kgK], 기체상수(R) 56.95 [J/kgK], 비열비(γ) 1.09, 음속(c) 134.2 [m/s]이다. 초기조건은 상온 하에서 정지해 있으며, 스트로크 곡선을 따라 가동부(피스톤과 고정아크접점)를 이동시켜 계산을 수행하였다. 총 스트로크 길이에 대한 시간구간은 700회로 나누었으며, 각각의 시간구간마다 100회 또는 500회(이동시)씩 반복하여 COMPAQ SP750 장비(Intel Xeon 733MHz, 1GB memory)에서 계산을 수행하였고, 총 계산시간은 32시간이 소요되었다. 피스톤의 압축으로 인하여 발생하는 유동은 전극이 분리됨에 따라 노즐을 통하여 출구로 빠져나가게 된다. 출구에는 압력조건과 종속변수의 구배가 0인 조건(Neumann condition)을 사용하였다. 벽경계면에서의 속도성분은 모두 점착조건(no-slip condition)을 사용하였다.

3.3 분할격자기법

컴퓨팅 기술의 발전과 더불어 전산유체역학은 공학분야 뿐만 아니라 과학분야에서도 유용한 도구로서 발전하고 있으며 점점 더 복잡한 문제를 해석하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 그 중 유동장 형상이 복잡한 경우와 유동장 내부에 여러 형상의 물체가 존재하며 이동하는 문제에 대해서는 기존의

이동일곡선좌표계(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 형상의 물체를 삽입하는 방식으로 항공분야에서 처음으로 시도되었으며, 현재 많은 분야에서 응용되고 있다[10]. 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 경계일치격자(boundary conforming mesh)가 된다. 따라서 기존 개념의 격자생성이 필요치 않으며, 추가되는 계산과정은 바탕격자에 삽입되는 물체에 의해 발생하는 교차점을 구하는 것이다.

본 연구에서 사용된 해석영역은 그림 1과 같으며, 이동부를 제외한 다른 형상은 CAD 프로그램에서 디자인하여 직각좌표계에 대하여 생성한 바탕격자에 삽입하였다. 따라서 유동장 내부에는 그림 2와 같은 세 가지 형태의 격자가 존재하게 된다.

3.4 격자변환기법

유동장 내부 물체의 이동을 모의하기 위한 방법으로 흔히 사용되는 이동격자법(sliding mesh method), Chimera법(composite overlapping block structure approaches)[11], FAME 법(flexible mesh embedding techniques)[12] 등은 복잡한 보간기법의 문제점을 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서는 차단부내 피스톤과 고정접점의 상대운동을 모델링 하기 위하여 그림 3과 같이 시간에 대해서 고정된 계산격자 안에서 셀의 물질특성을 변화시키는 격자변환기법(mesh transformation method)을 사용하였다.

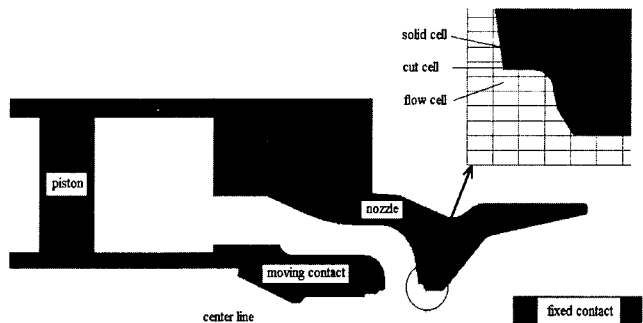


그림 1 가스차단기 내부 해석영역
Fig. 1 Calculation domain in a GCB

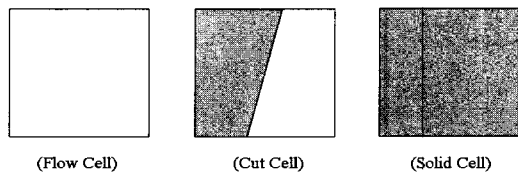


그림 2 세 가지 형태의 격자
Fig. 2 Three types of cells

이 방법은 스트로크(stroke)에 따른 각 스텝의 이동거리를 계산하여 고체영역인 피스톤과 고정점점의 셀 위치를 파악하며, 이동이 일어나는 순간에는 진행방향 전방의 유체격자는 고체격자로 변환되고, 후방의 고체격자는 유체격자로 바뀌면서 피스톤과 고정점점의 운동을 모의하는 것이다. 물체가 유동장 안을 움직이게 되면 물체 벽면의 속도는 물체의 이동속도와 같은 값을 가지며, 이것은 이동 물체 주변 격자에서 운동량 생성항으로써 작용하게 된다. 따라서 전체 유동장에 물체가 이동하면서 생기는 운동량 생성에 대한 부분을 적절하게 대입해 주면 될 것이다. 이와 같은 방법으로 피스톤과 고정점점의 이동을 적용하기 위하여 보조프로그램을 작성하였고, 이를 주프로그램인 PHOENICS와 원활히 연결시켜 유동장을 계산할 수 있도록 프로그래밍 하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구의 계산을 위해서 지배방정식에 대해 전체 해석영역을 많은 작은 제어체적으로 분할하고, 유한체적법(finite volume method)과 엇갈린 격자망(staggered grid)방법으로 이산화하였으며 해석도구로서 상용코드인 PHOENICS를 이용하였다. 본 연구에서 사용한 PHOENICS는 열전달, 공기유동, 상변화 및 화학반응이 관련된 현상의 수치해석을 위하여 개발된 프로그램으로 열전달, 공기역학적 설계, 오염물질 전파 및 연소현상 등에 응용된다. PHOENICS는 완전 암시 기법(fully implicit scheme)을 사용한 유한체적법 코드로서 속도 등의 벡터량과 압력, 온도 등의 스칼라량의 존재 위치가 서로 다른 엇갈린 격자계를 사용한다. 또한 운동량 방정식의 압력장을 처리하기 위해서 SIMPLEST방법을 사용한다. 이 방법은 이산화 방정식의 대류항을 계수항으로 처리하지 않고 생성항으로 처리하여, 수렴을 가속시키고 격자간격의 감소에 따르는 수렴성의 저하를 어느 정도 막아주는 장점을 가지고 있다. 실제 프로그램의 운영에서는 대류항을 처리하기 위하여 복합도식(hybrid scheme)을, 경계면에서의 확산계수를 처리하기 위하여 조화평균을 이용하였다. 반복계산시 종속변수들의 수렴정도를 점검하기 위하여 잉여치(Residual) 값이 조사되었으며, 각 종속변수에 대하여 잉여치 값이 10^{-3} 이하에 도달하면 수렴된 것으로 간주하였다.

해석 모델에 대한 수치해석 결과를 검증하기 위하여 피스톤 전면과 고정점점 선단에서 측정된 압력값을 그림 4와 5에 백분율비로 비교하였다. 스트로크 곡선은 계속된 결과를 다항함수로 보간된 형태를 사용하였으며, 이 함수의 미분값이 피스톤의 이동 속도가 된다.

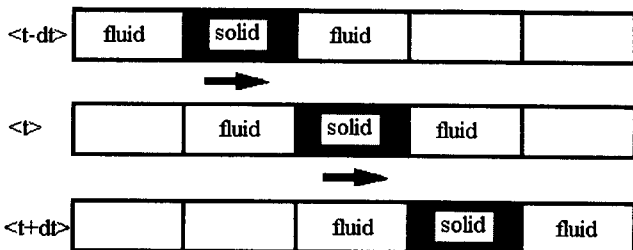


그림 3 격자변환기법을 이용한 이동부 모델링
Fig. 3 Modelling of block movement

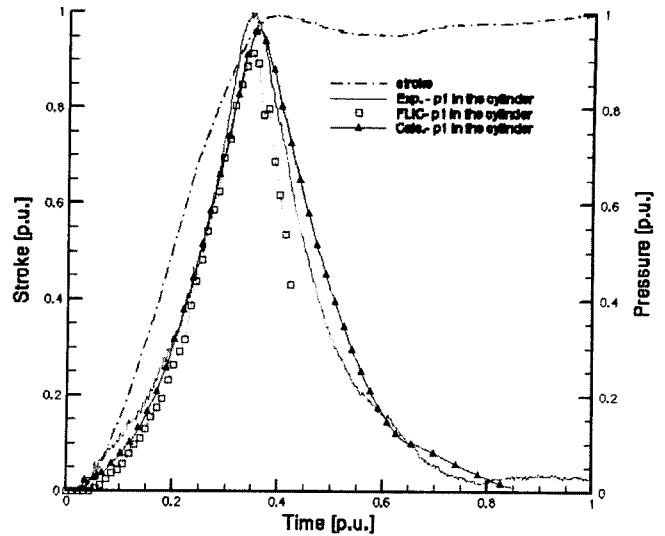


그림 4 피스톤 전면부 압력상승 비교
Fig. 4 Comparison of pressure rise in a cylinder

그림 4는 계산된 피스톤 전면에서의 압력(p1)을 개발 시험 시 측정된 결과와 그리고 임의의 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[13]을 사용하여 계산한 결과를 비교한 것이다. 실린더 내부의 피스톤 압축으로 인한 압력상승은 차단능에 큰 영향을 주며, 필요한 차단력을 얻기 위해서는 충분한 압력상승이 확보되어야 한다. 스트로크 시작과 함께 상승되는 압력은 고정점점이 노즐목을 완전히 빠져나가 고정점점과 노즐 하류장 사이의 충분한 유동공간이 확보되는 지점인 스트로크가 전체 스트로크에 70% 진행된 이후에도 압력상승이 꾸준히 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이는 노즐목의 마하수가 1에 도달해서 하류에서의 조건에 관한 정보가 상류로 전달될 수 없는 즉, 노즐에서의 유동조건에 아무런 영향을 미치지 못하는 상태인 노즐 유동이 질식(choking)되었기 때문이다. 따라서 노즐의 개방과 같은 배압(back pressure)의 변화에 관계없이 빠져나가는 질량 유량이 일정하게 되므로, 실린더에서 노즐목에 걸쳐 계속적으로 압력상승이 이루어지게 된다. 본 연구의 계산결과를 비교할 때, 최대압력상승이 발생하는 시간은 FLIC법과 비슷하게 정확한 값을 예측하고 있지만, 최대압력 상승치의 정확성 및 스트로크가 모두 끝난 후의 경향은 FLIC법보다 정확하게 실험결과를 예측하고 있음을 볼 수 있다. 이는 노즐과 고정점점 사이에서 발생하는 충격파와 초음속 유동에 대한 본 연구 해석방법의 타당성을 간접적으로 판단할 수 있는 것이라 할 수 있다.

고정점점 중심부에 압력센서를 설치하여 이 부분에서의 압력측정결과를 해석결과와 그림 5에 비교하였다. 차단부를 구성하고 있는 부분 중에서 고정 아크 점점 부근은 극간 절연 회복 특성이 가장 취약하기 때문에, 이 부분에 대한 정확한 유동해석이 이루어져야 한다. 하지만 실험에서 측정된 고정점점 선단부의 압력은 노즐목을 지나 생성되는 초음속 유동장이 고정점점에 부딪치면서 운동에너지 감소로 발생하기 때문에, 실린더 내부의 압력상승에 대한 예측만큼 정확한 해석

결과를 이끌어 내는 것은 어렵다고 판단된다. 본 연구의 결과를 살펴보면, 정량적으로는 정확히 예측하지 못하고 있지만 정성적으로 매우 일치하며, 기존의 다른 수치해법보다 정확한 과도특성을 예측하고 있다. 이는 본 연구에서 적용한 해석기법의 타당성을 입증할 수 있는 것으로 Causon 등[14]의 연구결과와 같이 초음속 유동해석에 대한 분할격자기법의 타당성을 평가할 수 있는 충분한 결과라 판단된다.

그림 6은 접점 이동에 따라 고정접점 선단에서의 압력을 실린더 압력을 기준으로 하는 압력비로 나타내었다. SF6 가스는 공기에 비해 큰 임계압력비(≈ 0.57)를 갖기 때문에 노즐목 부근에서 음속선이 형성되어 충격파의 형성 및 이후의 유동을 불안정하게 하기 쉽다. 본 연구의 해석대상은 스트로크가 51%(영역 A) 진행되면 임계압력비에 도달하는 것으로 예측되었으며, 스트로크 82% 진행 전후에는 압력비가 다시 상승되는 것으로 보아 고정접점 부근에 완전한 초음속 유동장이 형성됨을 판단할 수 있다.

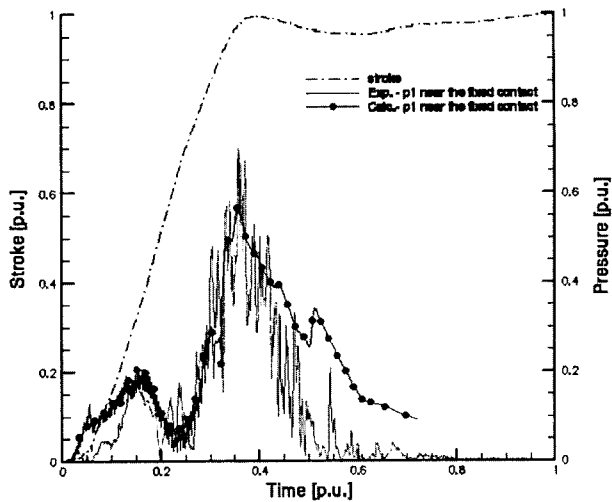


그림 5 고정접점 선단부 압력상승 비교
Fig. 5 Comparison of pressure rise in front of fixed contact

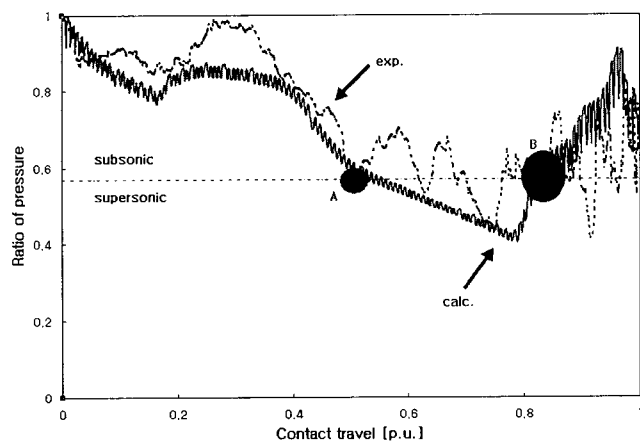


그림 6 실린더 압력에 대한 고정접점 선단부 압력
Fig. 6 Ratio of pressure in front of fixed contact against pressure in a cylinder

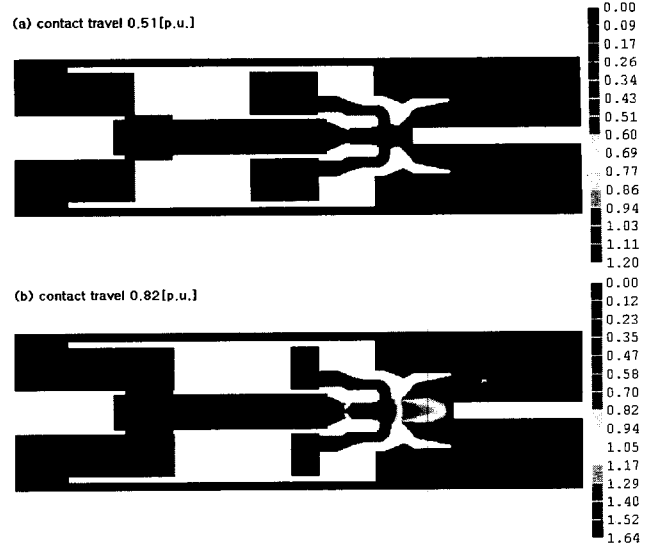


그림 7 접점 이동에 따른 마하수분포 변화
Fig. 7 Distribution of Mach number between contact travel 0.51pu and 0.82pu

이에 대한 유동특성 파악을 위하여 그림 7에 스트로크가 완결되었을 때를 100%로 했을 경우, 스트로크 51%, 82%에서의 마하수 분포를 나타내었다. 실린더 내부의 압력은 피스톤의 압축으로 인하여 스트로크가 끝날 때까지 계속 상승한다. 스트로크가 51% 진행되었을 경우 임계압력비에 도달했기 때문에 이후 유동은 노즐목 부근에서 급격히 가속되어 노즐 발산각을 따르는 유동을 형성한다. 이후 스트로크의 진행에 의하여 계속적인 실린더 내부 압력상승과 노즐 확대부로 노즐 하류장은 일련의 팽창과를 통해 고정접점을 향하는 초음속 유동장을 형성하게 된다. 노즐을 통한 초음속 유동은 노즐 하류장에 위치하고 있는 고정접점으로 인하여 자유제트(free jet)가 아닌 충돌제트(impinging jet)의 모양이 관찰된다[15].

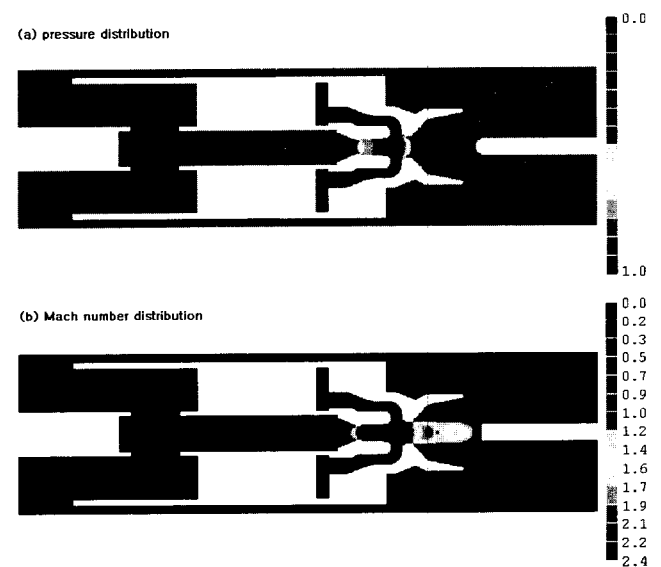


그림 8 압력분포와 마하수분포
Fig. 8 Distribution of pressure and Mach number between arcing contacts

참고 문헌

해석모델과 같은 파괴형 가스 차단기 소호부에 형성되는 유로는 높은 추력을 얻을 수 있도록 배기가스를 가능한 한 최대속도로 가속시키기 위해 로켓 추진체에서 사용하는 수축-확대 노즐과 같은 형태로 되어있다. 그리고 파괴 실린더 내부의 압력은 물론 노즐목 부근에 음속선이 발생하는 지점과 고정점 사이의 거리가 스트로크에 의해서 시간에 따라 변화하기 때문에 발생하는 충격파의 형태 또한 다양하다. 따라서 충격파가 발생할 때 충격파의 위치가 어디인가를 정확히 예측하는 것은 유동특성을 파악하고, 가스차단기의 성능을 얻기 위한 중요한 조건 중의 하나이다. 노즐목과 고정점 사이에서 발생하는 충격파는 큰 압력구배를 갖는 영역을 형성하여, 그림 8과 같이 고정점 선단 부근에서 심한 압력변동을 일으킨다. 본 연구의 해석대상에서 발생하는 충격파의 형태는 노즐목과 고정점 사이에서는 마름모 형태의 의사충격파(pseudo-shock wave)이며, 고정점 앞부분에서는 아치형태의 이탈충격파(detached shock wave)임을 파악할 수 있다 [16]. 이와 같이 유동해석으로부터 얻어진 결과를 효과적인 차단특성을 나타낼 수 있는 노즐설계 및 실린더 형상설계 등에 반영할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 복잡한 형상으로 구성되어 있는 가스차단기의 설계, 성능개선 및 검증을 위해서 전계해석과 더불어 매우 중요시되고 있는 유동해석을 원활히 수행하며, 이를 설계에 즉시 반영할 수 있도록 CFD-CAD 통합설계 기술을 개발하였다. 이를 위하여 분할격자기법과 격자변환기법을 사용하여 직교 좌표계에 적용함으로써 CAD S/W와 CFD를 원활히 상호연결시킬 수 있도록 하였으며, 주요 설계 인자를 정확하면서도 쉽게 변경하여 해석함으로써 경제적, 시간적으로 차단 성능 평가와 설계 변경 등을 용이하게 하였다.

이에 대한 검증을 위하여 파괴식 가스차단기 내부의 아킹 현상을 고려하지 않는 냉가스 유동해석을 수행하였고, 파괴 실린더 내의 압력 및 고정아크점 선단에서의 압력을 실험 결과 및 FVFLIC 해석결과와 비교하였다. 실린더 내의 최대 압력 상승치 및 최대압력상승 시간은 실험결과와 잘 일치하였으며(오차 5% 미만), 고정아크점에서의 압력도 기존의 다른 기법보다 우수한 결과를 나타내었다. 따라서 가스차단기 설계에 유동해석 기술이 적용되는 최종목표인 진상소전류 차단성능, 근거리선로고장에 대한 차단성능, 단자단락고장에 대한 차단성능의 예측에도 적용할 수 있는 가능성을 확보하였다.

본 연구에서는 고정점점에 대한 모델링을 곡선부를 직선으로 처리하였지만, 분할격자기법의 지속적인 연구를 통해 조만간 이동부의 곡률화를 구현할 수 있으리라 확신한다. 그리고 유동해석결과를 이용하여 신뢰성 있는 차단성능예측 결과를 얻기 위해서 보다 정확한 압축성유동, 난류유동 등의 복잡한 유동특성을 파악할 수 있는 해석기술이 요구되며, 아킹현상에 대한 타당성 있는 아크모델의 개발 등이 선행되어야 한다. 본 연구는 이러한 모든 요구 조건을 충족시킬 수 있도록 계속 진행될 것이며, 신뢰성 있는 연구를 위해 실험적 연구를 병행하여 실시할 계획이다.

- [1] Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington, D. C., 1980.
- [2] Mori, T., Ohashi, H., Mizoguchi, H., Suzuki, K., "Investigation of Technology for Developing Large Capacity and Compact Size GCB", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, pp. 747-753, 1997.
- [3] Donna, C., Randall, J. L., "A Cartesian Grid Finite-Volume Method for the Advection-Diffusion Equation in Irregular Geometries", Journal of Computational Physics, Vol. 157, pp. 143-180, 2000.
- [4] Yang, G., Causon, D., Ingram, D., Saunders, R., and Batten, P., "A Cartesian Cut Cell Method for Compressible Flows-part B: Moving Body Problems", Aeronautical Journal, Vol. 101, No. 1001, pp. 57-65, 1997.
- [5] Spalding, B., "PHOENICS Encyclopedia, article on CFD to SFT, The Status and Future of CFD", 1998.
- [6] 김태균, 허남건, "격자변환기법을 이용한 이동물체 주위의 유동해석", 대한기계학회논문집 B권, 제25권, 제4호, pp. 593-599, 2001.
- [7] 송기동, 이병윤, 박경엽, 박정후, "초고압 SF₆ 가스차단기의 소전류 차단성능 해석기술 I", 대한전기학회 논문지 50B권 7호, pp. 331-337, 2001.
- [8] 명현국, "전산열유체공학", 문운당, pp. 76-275, 1999.
- [9] Launder, B. E., Spalding D. B., "The Numerical Computations of Turbulent Flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp. 269-289, 1974.
- [10] Berger, M. J., Aftomis M. J., Melton, J. E., "Adaption and Surface Modelling for Cartesian Mesh Methods", AIAA-95-1725-CP, pp. 881-891, 1995.
- [11] Steger, J. L., Dougherty, F. C., Benek, J. A., "A Chimera Grid Scheme", In Advances in Grid Generation, ASME FED-5, Ghia KN, Ghia U (eds), pp. 59-69, 1983.
- [12] Albone, C. M., "Embedded Meshes of Controllable Quality Synthesized from Elementary Geometric Features", AIAA Paper, No. 92-0662, 1992.
- [13] Zhao, Y., Winterbone, D. E., "The Finite Volume FLIC Method and its Stability Analysis", Int. J. Mech. Sci., Vol. 37, No. 11, pp. 1147-1160, 1995.
- [14] Causon, D. M., Ingram, D. M., Mingham, C. G., Yang, G., Pearson, R. V., "Calculation of shallow water flows using a Cartesian cut cell approach", Advances in Water Resources, Vol. 23, pp. 545-562, 2000.
- [15] Oosthuizen, P. H., Carascallen, W. E., "Compressible Fluid Flow", McGraw-Hill, pp. 179-224, 1997.
- [16] Suzuki, K., Toda, H., Aoyagi, A., Ikeda, H., Kobayashi, A., Ohshima, I., Yanabu, S., "Development of 550kV 1-Break GCB (Part I)", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp. 1184-1191, 1993.

저 자 소 개



이 종 철 (李 鍾 哲)

1971년 1월 2일 생. 1994년 성균관대 기계공학과 졸업. 1996년 동대학원 석사학위 취득. 2000년 동대학원 박사학위 취득. 2001년 3월~현재 LG산전(주) 전력연구소 전력기술연구1팀 선임연구원
Tel : 043-261-6535
E-mail : jcleed@lgis.com



오 일 성 (吳 一 成)

1960년 12월 22일 생. 1986년 연세대 금속공학과 졸업. 1990년 미시간 주립대 재료공학과 석사학위 취득. 2000년 동대학원 박사학위 취득. 1996년~현재 LG산전(주) 전력연구소 전력기술연구1팀 책임연구원
Tel : 043-261-6520
E-mail : isoh@lgis.com



안 희 섭 (安 熙 燮)

1970년 8월 30일 생. 1994년 경북대 기계공학과 졸업. 2000년 동대학원 석사학위 취득. 2000년 5월~현재 LG산전(주) 전력연구소 전력기술연구1팀 주임연구원
Tel : 043-261-6536
E-mail : hsan@lgis.com



최 종 웅 (崔 鍾 雄)

1957년 4월 15일 생. 1981년 부산대 기계공학과 졸업. 1995년 충남대 컴퓨터공학과 석사학위 취득. 1999년 동대학원 박사학위 취득. 1997년 1월~현재 LG산전(주) 전력연구소 연구소장
Tel : 043-261-6003
E-mail : jongwoongc@lgis.com