

분할격자법을 이용한 초고압 가스차단기 유동해석

이종철*·안희섭*·김윤제**

The Application of Cartesian Cut Cell Method for a High-Voltage GCB

Jong C. Lee*, Heui-Sub Ahn* and Youn J. Kim**

Key words : Gas Circuit Breaker(가스차단기), Mesh Transformation Method(격자이동기법), Cartesian Cut Cell Method(분할격자법), Nozzle(노즐)

Abstract

It is important to develop new effective technologies for increasing the interruption capacity and reducing the size of a GCB (Gas Circuit Breaker). It is not easy to test the real GCB model in practice as in theory. Therefore, a simulation tool based on a CFD (Computational Fluid Dynamics) algorithm has been developed to facilitate an optimization of the interrupter. But the choice of grid is not at all trivial in the complicated geometries like a GCB. In this paper, we have applied a CFD-CAD integration using Cartesian cut-cell method, which is one of the grid generation techniques for dealing with complex and multi-component geometries.

1. 서론

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 검증을 위해서 전자계해석과 더불어 매우 중요하다. 하지만 라플라스나 포와송 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 원활히 구현해야 하며, 노즐 부근 접점 사이에서 발생하는 충격파 및 초음속(supersonic) 유동을 정확히 예측해야 하기 때문에 단락시 발생하는 아킹현상 모사를 포함하지 않는 냉가스 유동해석조차 계산이 쉽지 않은 문제이다. 또한 노즐 및 실린더 등의 유동장 내부에 존재하는 임의 형상의 교체부는 기존의 격자생성 방법인 경계면 밀착 좌표계(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.

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)[2]을 이용한 CFD-CAD 통합해석(CFD-CAD integration) 기술을 개발하였다. 현재 주류를 이루고 있는 방법인 일반 곡선 좌표계를 이용한 계산방법은 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 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[3], 스트로크(stroke) 파형에 맞는 격자변환기법(mesh transformation method)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. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 아킹현상 모사를 포함하지 않는 냉가스 유동해석을 수행하고자 한다. 비정상 압축성 난류유동에 대한

* LG산전(주) 전력연구소, jcleed@lgis.com

** 성균관대학교 기계공학부, yjk@skku.ac.kr

연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 그리고 k-ε 난류모델을 사용할 때의 지배방정식은 다음과 같다.

Mass conservations:

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

Momentum conservation:

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

Energy equation:

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

여기서,

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

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

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

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

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

Turbulence kinetic energy and the dissipation rate:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \mu_t G - \rho \epsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}$$

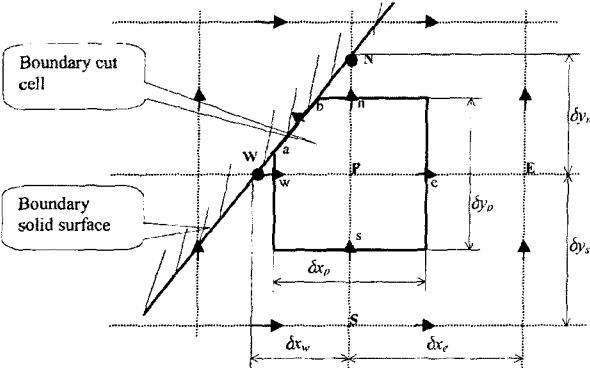


Fig. 1 Boundary cut-cell on a Cartesian grid[2].

$$+ \frac{\epsilon}{k} (C_1 \mu_t G - C_2 \rho \epsilon) \quad (10)$$

여기서

$$\mu_t G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (11)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

위 식에 사용된 난류모델 상수들은 참고문헌[4]을 참고하기 바란다.

2.2 격자계의 선정

유동장은 지배방정식을 계산하기 위해 사용되는 수치 기법에 적합한 격자로 나누어져야 한다. 현재 복잡한 형상(다수의 경사면과 곡면을 가진 형상)을 다루어야 하는 문제에 널리 사용되고 있는 것은 곡선좌표계(curvilinear coordinate)와 비정렬 격자계(unstructured grid)이다. 하지만 이러한 방법들은 숙련된 설계자라도 계산을 위한 격자생성 작업에 많은 시간을 투자해야 하는 어려움이 있다.

본 연구에서는 직교직선좌표에서 격자를 생성하고, 유동장 내부의 불규칙 형상을 취급하기 위하여 격자분할기법을 이용하였다. 이것은 불규칙 경계면을 일련의 직각 계단형으로 모사하여야 하는 단점이 있지만, 격자생성의 용이성으로 인하여 최근 많은 연구사례가 발표되고 있다. 분할격자기법에서 사용된 보간은 임의 변수의 벽면값과 인접한 격자점에서의 값을 사용하여 선형적으로 처리한다. Figure 1에서 볼 수 있듯이 격자점 P의 제어체적면 w에서의 속도벡터 u는 계산되지 않고, 기지의 값인 W, e에서의 속도 u를 사용한 보간으로 구한다. 이러한 보간은 보존을 만족시키지 않는다는 것이 명백하지만 발생하는 오차의 영향은 적다고 알려져 있다[2].

2.3 격자변환기법

수치해석의 적용분야 중에서 경계이동을 포함하는 많은 경우가 있다. 본 연구의 해석대상인 가스차단기 또한 Fig. 2의 작동원리에서처럼 피스톤 이동에 의해 압축가스를 생성하여 두 접점 사이에서 발생하는 아크를 소호(quenching)해야 하기 때문에 유동장 내부 복잡한 형상의 여러 부분을 한꺼번에 이동시킬 수 있도록 프로그래밍 해야 한다. 유동장 내부 물체의 이동을 모의하기 위한 방법으로 널리 사용되는 Chimera법(composite overlapping block structure approaches)은 이동물체 주위를 구성한 격자와 주변의 격자가 겹치게 되는데 각각의 기준좌표에 대한 보간에서 여러 가지 복잡한 과정을 거쳐야 한다.

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 시간에 대해 고정된 계산 격자 안에서 셀의 물질특성을 변환시키는 격자변환기법을 사용하였다. 이 방법은 스트로크(stroke)에 따른 각 스텝의 이동 거리를 계산하여 고체영역인 피스톤과 고정점점의 셀 위치를 파악하며, 이동이 일어나는 순간에는 진행방향 전방의 유체격자는 고체격자로 변환되고, 후방의 고체격자는 유체격자로 바뀌면서 피스톤과 고정점점의 운동을 모사하는 것이다. 물체가 유동장 안을 움직이게 되면 물체 벽면의 속도는 물체의 이동 속도와 같은 값을 가지며, 이것은 이동 물체 주변 격자에서 운동량 생성항으로써 작용하게 된다. 따라서 전체 유동장에

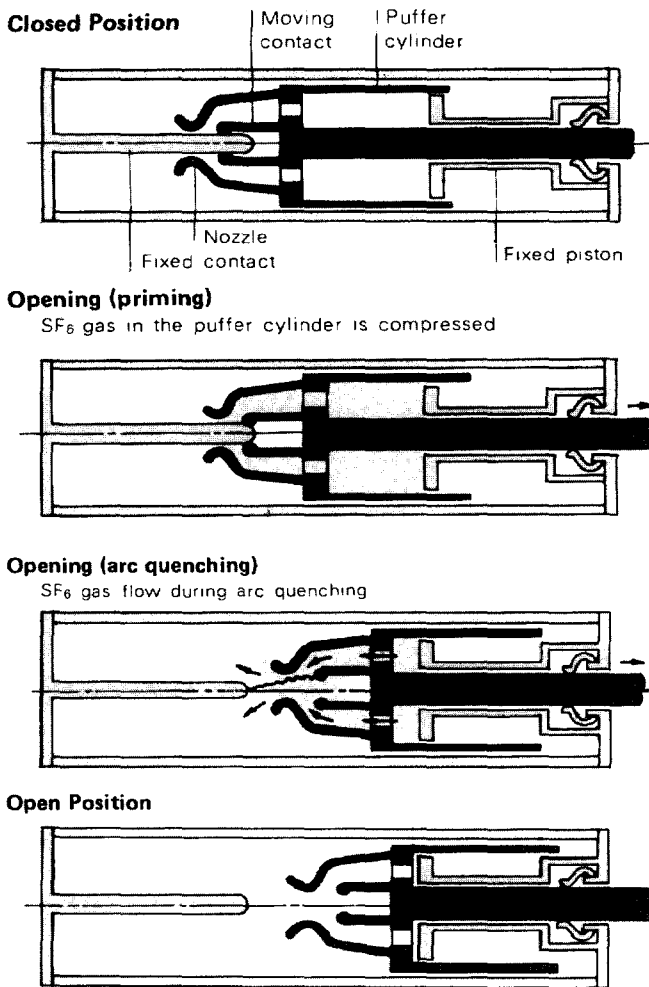


Fig. 2 Operation mechanism of a puffer-type gas circuit breaker (Fuji Electric, 1998).

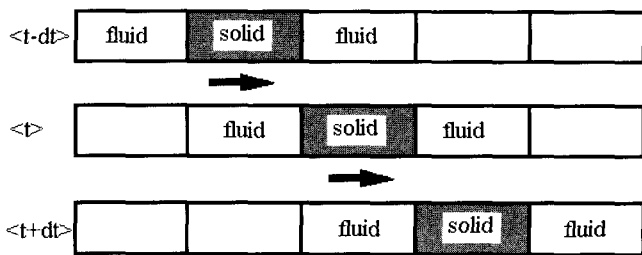


Fig. 3 Modeling of the mesh transformation method.

물체가 이동하면서 생기는 운동량 생성에 대한 부분을 적절하게 대입해 주면 될 것이다. 이와 같은 방법으로 피스톤과 고정접점의 이동을 적용하기 위하여 보조프로그램을 작성하였고, 이를 주프로그램인 PHOENICS와 원활히 연결시켜 유동장을 계산할 수 있도록 프로그래밍 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 계산을 위해서 지배방정식에 대해 전체 해석 영역을 많은 작은 제어체적으로 분할하고, 유한체적법과 엇갈린 격자망 방법으로 이산화하였으며, 해석도구로서 상용코드인 PHOENICS를 이용하였다.

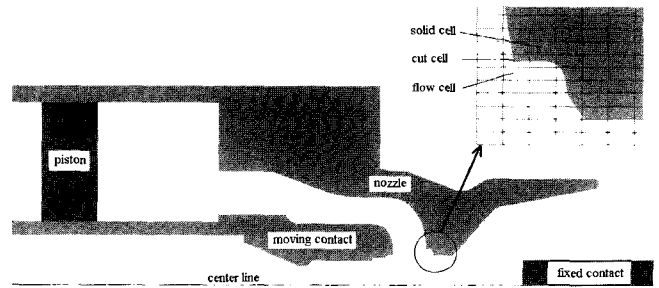


Fig. 4 Calculation domain and Cartesian cut-cell grid system in a GCB.

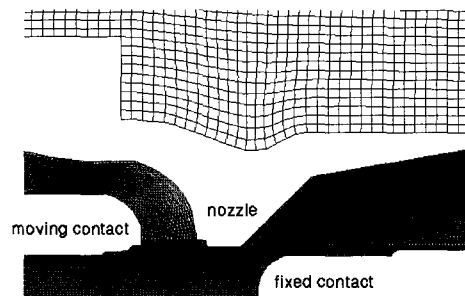


Fig. 5 BFC grid systems in a GCB.

계산영역 중 중요한 부분을 Fig. 4에 나타내었으며, 분할격자기법을 이용한 본 연구에서는 경계면 밀착 좌표계를 사용하여 모델링한 방법(Fig. 5 참조)에 비하여 격자생성에서 많은 시간을 절약할 수 있었기 때문에 다양한 형상의 노즐에 대한 해석이 가능하였다.

해석 모델에 대한 수치해석 결과를 검증하기 위하여 피스톤 전면과 고정접점 선단에서 측정된 압력값을 Figs. 6과 7에 백분율비로 비교하였다. 스트로크 곡선은 계속된 결과를 다항함수로 보간된 형태를 사용하여 계산에 이용하였다.

Figure 6는 피스톤 전면에서의 압력(p1)을 제품 개발 시험시 측정된 결과와 FVFLIC(Finite Volume Fluid in Cell)법을 사용하여 계산한 결과를 본 연구의 결과와 비교한 것이다. 실린더 내부의 압력은 차단성능에 커다란 영향을 미치며, 필요한 차단력을 얻기 위해서는 충분한 압력상승이 확보되어야 한다. 본 연구의 계산결과를 비교할 때, 최대압력상승이 발생하는 시간은 FVFLIC법과 비슷하게 정확한 값을 예측하고 있지만, 최대압력 상승치의 정확성 및 스트로크가 모두 끝난 후의 경향은 보다 정확하게 실험결과를 예측하고 있음을 볼 수 있다. 이는 노즐과 고정접점 사이에서 발생하는 충격파와 초음속 유동에 대한 본 연구 해석방법의 타당성을 간접적으로 판단할 수 있는 것이라 할 수 있다.

고정접점 중심부에 압력센서를 설치하여 측정한 결과를 해석결과와 Fig. 7에 비교하였다. 차단부를 구성하고 있는 부분 중에서 고정 아크 접점 부근은 극간 절연회복 특성이 가장 취약하기 때문에, 이 부분에 대한 정확한 유동해석이 이루어져야 한다. 하지만 실험에서 측정된 고정접점 선단부의 압력은 노즐목을 지나 생성되는 초음속 유동장이 고정접점에 부딪치면서 운동에너지 감소로 발생하기 때문에, 실린더 내부의 압력상승에 대한 예측만큼 정확한 해석은 기대하기 어렵다. 본 연구의 결과 또한 정량적으로 정확히 예측하지 못하고 있지만 정성적으로 매우 일치함을 볼 수 있다. 이는 Yang 등[2]의 연구결과와 같이 압축성 유동해석에 대한 분할격자기법의 타당성을 평가할 수 있는 충분한 결과라 판단된다.

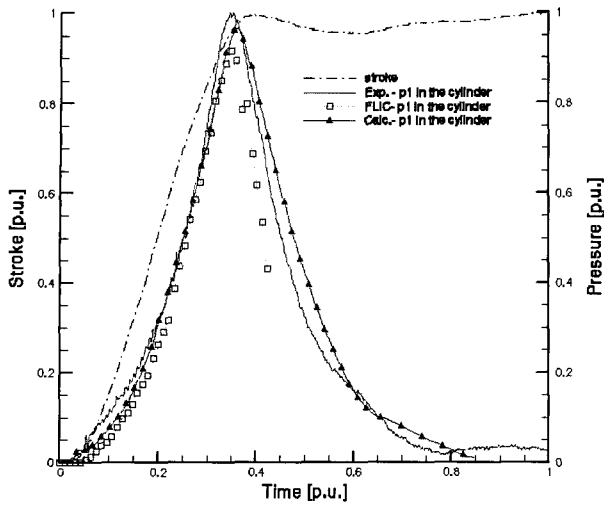


Fig. 6 Comparison of pressure rise in the puffer chamber.

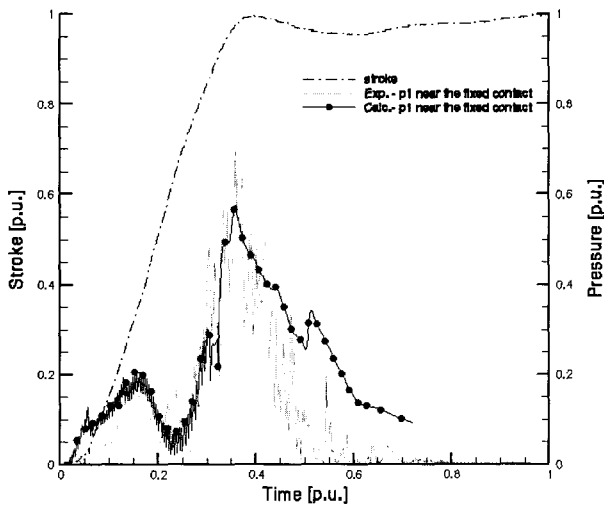
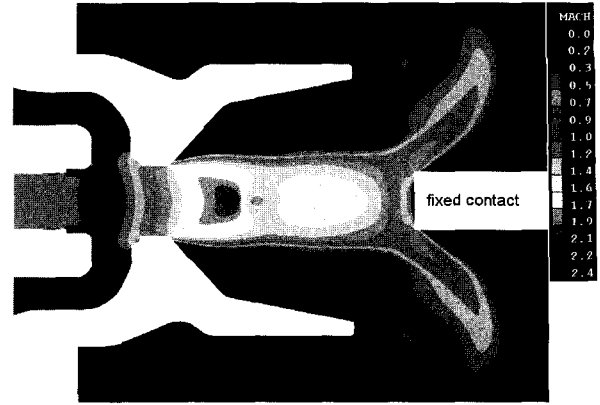


Fig. 7 Comparison of pressure rise in front of the fixed contact.

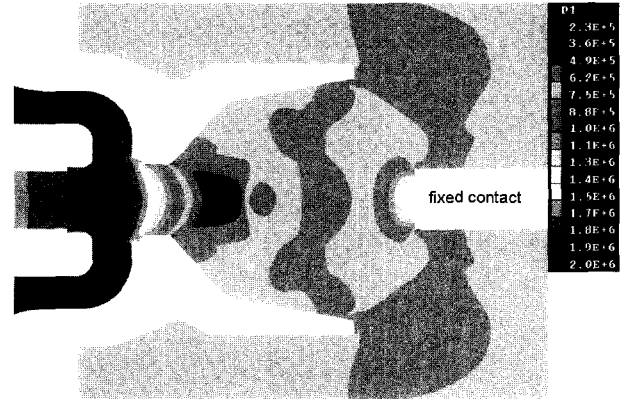
과파 실린더 내부 압력은 물론 노즐목 부근에 음속선 (sonic line)이 발생하는 지점과 고정접점 사이의 거리가 스트로크에 의하여 시간에 따라 변화하기 때문에 발생하는 충격파의 형태 또한 다양하다. 충격파가 발생하는 시점 및 위치가 어디인가를 정확히 해석하는 것은 유동특성을 파악하고, 가스 차단기의 성능을 얻기 위한 중요한 조건 중 하나이다. 스트로크가 끝날 무렵 노즐 하류장에 발생하는 충격파의 형태를 파악하기 위하여 Fig. 8에 마하수 분포와 압력 분포를 나타내었다. 노즐목과 고정접점 사이에서 발생하는 충격파는 큰 압력구배를 갖는 영역을 형성하여 고정접점 선단 부근에서 심한 압력 변동을 일으킨다. 발생하는 충격파의 형태는 노즐목과 고정접점 사이에서는 마름모 형태의 의사충격파(pseudo-shock wave)이며, 고정접점 앞부분에서는 아치형태의 이탈충격파(detached shock wave)임을 파악할 수 있다. 이와 같이 유동해석으로부터 얻어진 결과를 효과적인 차단특성을 나타낼 수 있는 노즐설계 및 실린더 형상설계 등에 반영할 수 있다.

4. 결론

분할격자법을 이용하여 가스차단기 유동해석을 수행한 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.



(a) Distribution Mach number



(b) Distribution of pressure

Fig. 8 Flow characteristics between two contacts just before finishing the travel.

- 1) 분할격자기법은 경계면 밀착 좌표계에 비하여 많은 노력과 시간을 줄일 수 있었으며, 모델의 형상변화 적용이 용이하여 쉽게 모델링 작업을 수행할 수 있었다.
- 2) 실린더 내부 피스톤 전면부와 고정접점 선단부에 압력센서를 설치하여 측정한 실험결과와 비교하여 정량적으로 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.
- 3) 가스차단기 내부에서는 피스톤의 압축과 이동물체의 이동이 시간에 따라 이루어지므로 내부에서 발생하는 충격파의 형태 또한 다양하며, 두 접점사이에서는 의사충격파를, 고정접점 선단에서는 이탈충격파를 파악할 수 있었다.
- 4) 분할격자기법은 불규칙 경계가 일련의 직각 계단형으로 근사되어야 하는 단점은 명백하지만 여러 가지 수치기법의 개발로 보완이 계속된다면 격자생성의 용이성이라는 장점으로 실제 제품개발 등의 산업기술에 CFD 적용이 더욱 활성화 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington D. C. (1980).
- [2] Yang, G., Causon, D., Ingram, D., Sounder, R., and Batten, P., A Cartesian Cut Cell Method for Compressible Flow, Aeronautical Journal, Vol. 101 (1997), pp. 57-65.
- [3] Spalding, D. B., Article on CFD to SFT, The Status and Future of CFD, PHOENICS Encyclopedia (1998).
- [4] 김찬중, 길잡이 전산유체역학, 문운당 (1998).