

# PHOENICS Code를 이용한 초고압 GCB 열유동해석 An Analysis of Thermal Flow in an UHV GCB by Using PHOENICS Code

권양구(기계설계과)

Yang-Gu Kwon(Dept. of Mechanical Design)

Key Words: GCB(Gas Circuit Breaker, 가스차단기), CFD(Computational Fluid Dynamic 전산유체역학), Arc Model(아크모형).

ABSTRACT: This paper presents the results of thermal flow field analysis in an in puffer type model GCB. The physical model is based on the axisymmetric form of the equations which are coupled with an arc model including only ohmic heating in exception with radiative transports in the gas. The results were obtained by us independent of moving parts and by using the commercial CFD package called PHOEN

## 1. 서론

가스차단기의 개발, 개선 또는 설계검증에 있어서 가장 먼저 고려해야 하는 것은 아크소호에 필요한 압력상승은 얼마이며, 주어진 소호부내에서 가스는 어떻게 유동하는 것이 가장 효율적인가? 이다. 즉, 파퍼실린더에서 압축된 가스를 어떤 방향으로 아크를 향해 불어 줄 것인가? 아크를 소호한 후에 점점간의 가스를 어떻게 냉각시키며 아크에 의해 가열된 열가스를 어떻게 신속하게 배출할 것인가? 그리고 절연회복에 가장 취약한 부분인 아크점점상에 가스밀도를 어떻게 증가시킬 것인가? 라는 관점에서 노즐형상과 아크점점의 형상이 결정된다. 또한 파퍼실린더의 압력상승 시점과 전류차단시점(또는 회복전압)과 관련하여 개극속도(또는 스트로크)가 결정된다.

이상과 같이 가스차단기의 경우 소호가스를 어떻게 효율적으로 이용하는가에 따라 차단기의 차단성능이 결정되므로, 차단과정에 있어서 파퍼실린더의 압력상승뿐만 아니라 소호부내에서의 가스유동을 면밀히 관측할 필요가 있다. 하지만, 실험으로 이러한 가스유동을 관측하는 것은 차단기의 복잡한 구조 뿐만아니라 아크가 존재하는 경우의 아크열, 유도전압 등에 의해 쉽지 않은 문제이며, 차단부의 형상이 바뀔 때마다 실험으로 관측한다는 것은 시간과 경제적인 측면에서 큰 부담이 아닐 수 없다. 즉, 새로운 형태의 가스차단기를 개발하거나 기존의 가스차단기의 성능개선 및 검증을 위해서는 차단부의 가스유동해석이 전계해석과 더불어 매우 중요하며, 가스차단기의 개발과정에 있어서도 차단부내의 유동해석은 최우선적으로 고려하여야 할 만큼 필수적인 과정이다. 따라서, 유럽과 일본을 비롯한 선진외국에서는 이미 이러한 차단부내의 유동해석 프로그램을 자체 개발하거나 상용 프로그램을 활용하는 기술을 개발해 왔고, 최근에는 상용 프로그램을 이용하여 아크를 포함한 열가스 유동해석을 실시한 결과를 보고하고 있다<sup>(1,2)</sup>. 국내에서도 1993년말부터 차단부내의 냉가스 유동해석 프로그램 개발을 시작으로 현재는 아크를 포함한 열가스 유동해석 프로그램을 개발하는 단계에 있다<sup>(3,4)</sup>.

본 연구는 실제 SF<sub>6</sub>가스의 물성치를 데이터 베이스화하고 아크계산모델을 상용코드인 PHOENICS에 삽입하여 차단부내 열유동해석을 수행하였으며 차단부의 설계시에 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

## 2. 본론

### 2.1 유동해석의 접근방법

차단부내의 유동해석은 크게 냉가스 유동해석과 열가스 유동해석으로 나누어지며, 냉가스 유동해석의 결과는 주로 소전류 차단성능을 평가하는 데, 열가스 유동해석의 결과는 대전류 차단성능을 평가하는 데 주로 사용된다.

차단부내의 유동해석을 위한 접근방법에는 직접 프로그램을 작성하는 방법과 기존의 상용 CFD 프로그램을 활용하는 방법으로 나누어 볼 수 있다. 프로그램을 직접 개발하는 경우, 개발자의 의도대로 프로그램을 구성할 수 있다는 장점이 있지만, 일반적으로 전·후처리(Pre & Post Processor)기능이 미흡하여 차단부의 형태 또는 형상이 변경될 때 형상모델링과 계산 격자의 생성이 다소 불편하며, 계산결과와의 신뢰성에 있어서도 상용 CFD프로그램에 비해 상대적으로 떨어진다는 약점이 있다. 상용CFD프로그램을 이용하는 경우, 사용방법을 숙지하는 데 다소 시간이 필요하다는 단점이 있지만, 일단 개발된 적용방법은 차단부의 형상이 바뀌어도 적용할 수 있으며, 신뢰성이 확보될 수 있다는 장점이 있다.

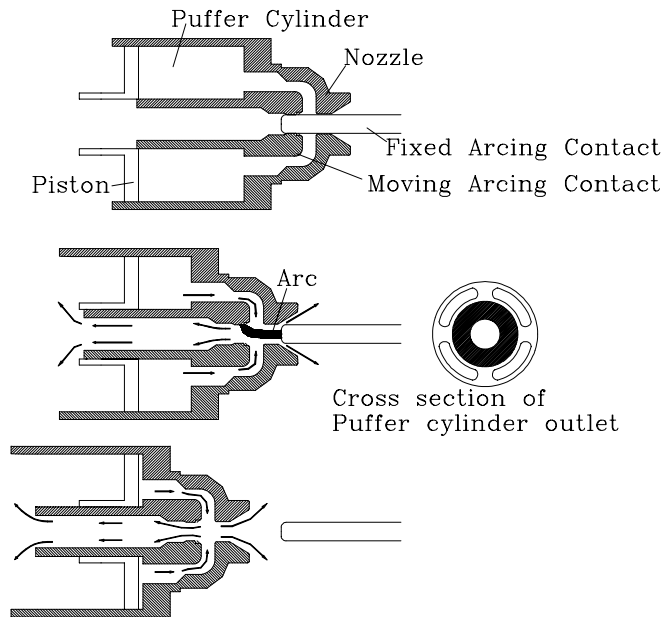


Fig. 1 Mechanism of the operation of a puffer-type GCB.

하지만, 프로그램을 자체 개발하거나 상용 CFD프로그램을 사용하는 데는 전제조건이 있는데, 프로그램 개발자는 유체역학(fluid dynamic)과 아크의 물리적 현상에 대한 충분한 이해가 있어야 한다. 특히, 아크현상은 그 물리적 현상이 대단히 복잡하여 정확하게 수식화하는 것이 현재로서는 거의 불가능한 실정이므로 아크모델에 대한 충분한 이해와 적용방법을 개발하지 않으면 안된다.

### 2.2 차단부내 유동해석상의 문제점들

차단부내 유동해석에 있어서 해결해야 하는 문제점들은 크게 다음과 같다.

**i) 가동부의 이동을 어떻게 모의할 것인가?**

자체 개발한 프로그램 또는 상용 CFD 프로그램을 이용하여 차단부내의 유동해석을 하는 경우, 가장 기본적인 문제는 차단부의 이동을 모의하는 것이다. 계산상의 편리함을 위해 실제와는 다르게 가동부가 움직이는 것 대신에 고정부인 피스톤과 고정아크접점이 움직인다고 가정하더라도 계산격자의 일그러짐과 계산과정의 비수렴성을 피하기 어렵다(Fig. 1 참조).

**ii) 가동부의 이동을 모의하면서 차단부형상을 정확하게 모델링할 수 있는 방안은?**

이것은 1)항의 문제와 직결되는 것으로, 특히 문제로 되는 것은 고정아크접점 선단의 곡률을 처리하는 것이다. 고정아크접점의 선단부분은 차단기의 소전류 차단성능을 파악하는 데 가장 중요한 부분으로써 가스밀도와 전계강도가 정확하게 계산되어야 한다. 따라서, 고정아크접점 선단의 곡률을 시간상에서 이동하면서 일그러짐없이 계산격자를 형성시켜 주어야 한다.

**iii) 상용 CFD 프로그램을 이용하는 경우, 아크모델링과 온도에 따른 소호가스(SF<sub>6</sub> 가스)의 특성치를 접목 (interface)시키는 방안은?**

현재까지 알려진 아크모델 및 SF<sub>6</sub> 가스의 물리적 특성치를 데이터 베이스화 하여 상용 CFD 프로그램과 접목시키는 문제가 있으며, 열가스 유동해석에 있어서 최우선적으로 해결하여야 할 문제이다.

**iv) 최고 20000 ~ 30000 K 정도의 아크를 모델링하여 전도(Conduction), 대류(Convection), 복사(Radiation) 등의 열전달 해석기법은?**

아크모델을 접목시킨다 하더라도 전도, 대류, 복사와 같은 열전달 과정을 동시에 해결하는 것은 용이하지 않다.

**v) 아크에 의한 아크접점의 용삭(melting)과 노즐의 용삭(ablation)의 모델링 방안은?**

차단부내 유동해석의 최종단계로 아크에 의한 아크접점의 용삭(melting)과 노즐의 용삭(ablation)을 고려하여야 하며, 특히 아크열에 의한 SF<sub>6</sub>가스의 화학적 변화까지 고려하여야 한다.

**vi) 해석결과에의 검증은?**

이상과 같이 아크를 포함한 열가스 유동해석 완결된다 하더라도 해석결과를 검증하기 위한 아크파라미터의 측정이 어려운 것이 현실이다.

본 논문은 위 문제들 중 i)~iii)항의 문제를 해결하기 위해(복사는 제외) 상용 CFD 프로그램 PHOENICS를 사용하였고, 모델링된 차단기는 효성중공업(주) 145kV 40kA 파피형 차에 대해 열유동계산을 수행하였다.

2.3 차단부의 유동해석

지배방정식

· 연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \tag{1}$$

· 운동량 보존방정식 :

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \text{ grad})\vec{u} = -\text{grad } P \tag{2}$$

· 에너지보존방정식 :

$$\rho \frac{\partial \vec{h}}{\partial t} + \vec{u} \text{grad}(\rho h) + \text{div}(\vec{P} \vec{u}) = S_{\text{arc}} \quad (3)$$

여기서,  $\vec{u} = (u_z, u_r)h$  : 엔탈피,  $S_{\text{arc}}$  : 아크열원

차단부의 유동해석에 있어서 최우선적으로 고려했던 문제점은 가동부가 이동함에 따라 계산격자의 찌그러짐을 방지하는 해석기법을 모색하는 것이었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Fig. 2와 같이 가동부의 이동에 대해 계산격자의 크기와 위치가 변하지 않는 즉, 고정된 계산격자(Fixed Grid)를 사용하였다. Fig. 2에서 ㉠로 표시된 셀(cell)이 시간  $t$ 에서 고체(solid)이었다가  $t + \Delta t$ 에서 기체영역으로 변할 경우, 이 셀에서의 유동파라미터는 주위 셀 a, b, c 의해 식(1), (2), (3)의 질량, 운동량 및 에너지 보존방정식이 적용된다.

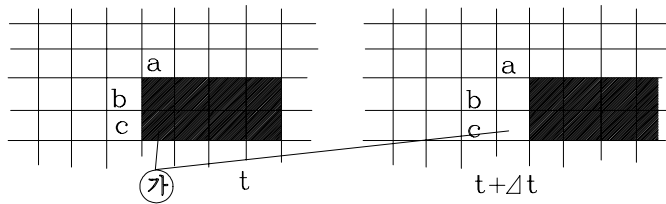


Fig. 2 Moving part and fixed grid.

전체 계산영역에 이와 같은 해석수법이 적용되며, 해를 얻는 과정은 Fig. 3과 같다.

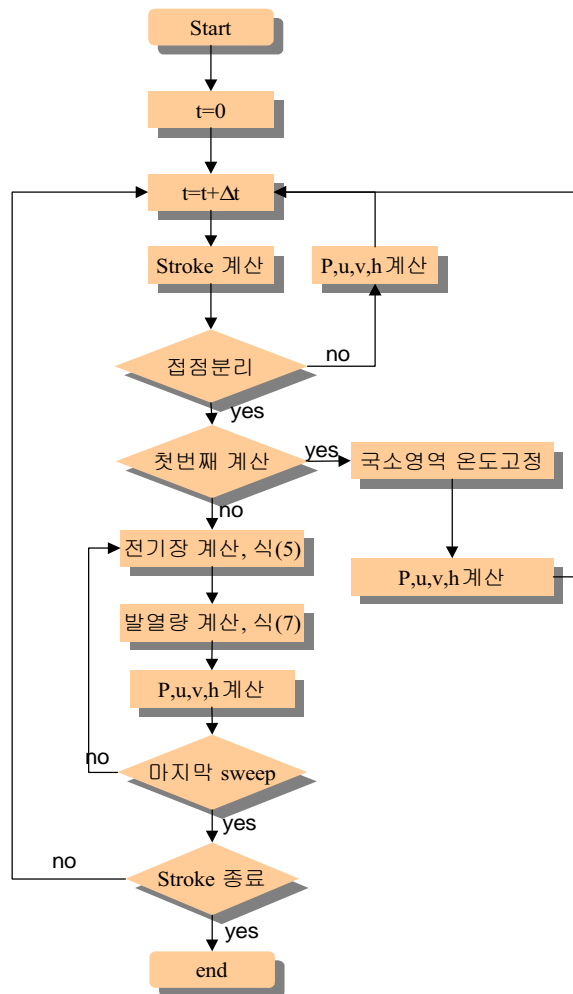
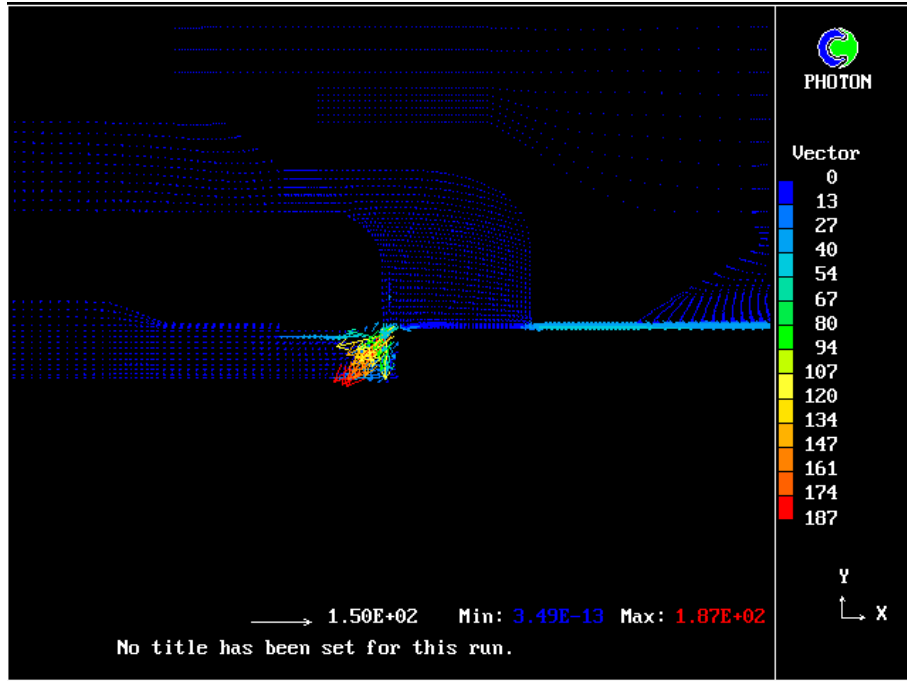


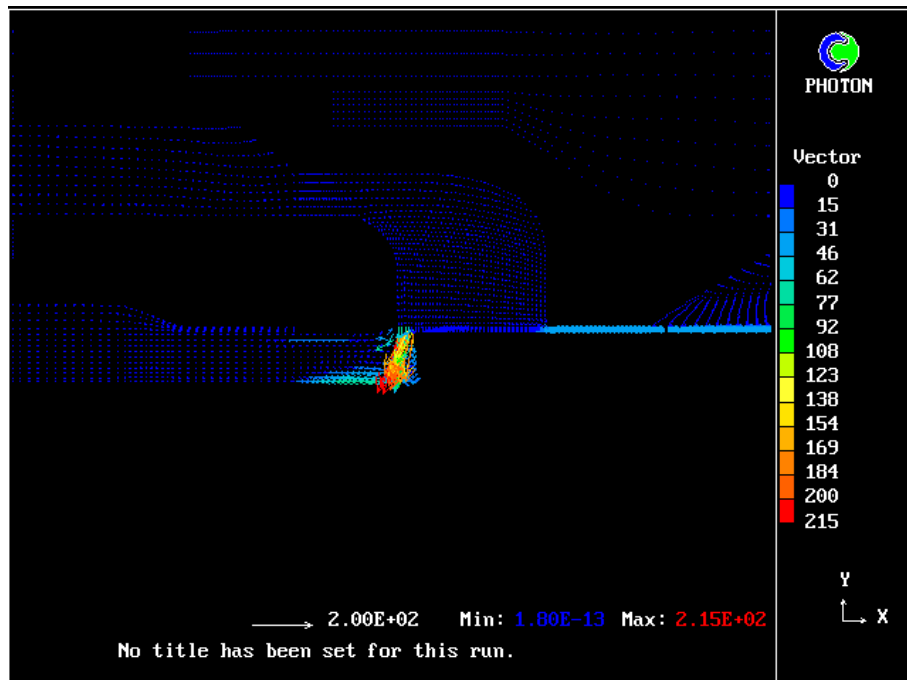
Fig. 3 Overall procedure of calculation

계산에 필요한 SF<sub>6</sub>가스의 물성치는 주어진 압력, 온도에 대해 곡선적합화(Curve fitting)를 통해 함수화하였고, 가동부의 이동에 따른 속도와 위치는 측정된 스트로크곡선을 시간에 대해 함수화하여 구하였다.

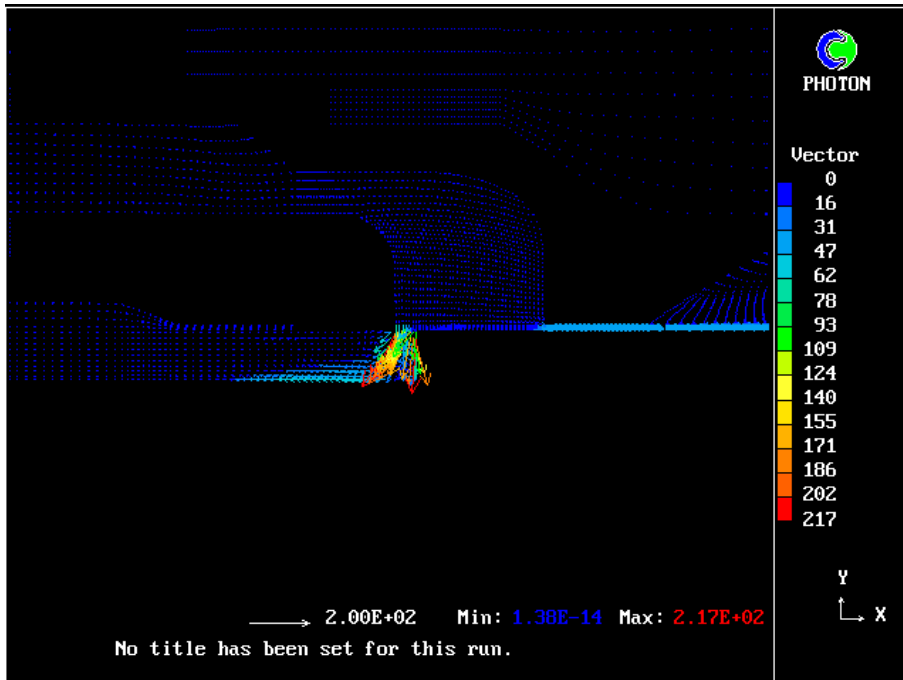
Fig. 4, 5와 6은 시간에 따른 속도, 온도 및 밀도변화를 보여주고 있으며, 계산격자수는 27,740(380×73)여개로 PC Pentium Pro급에서 약 3일간의 계산시간이 소요되었다.



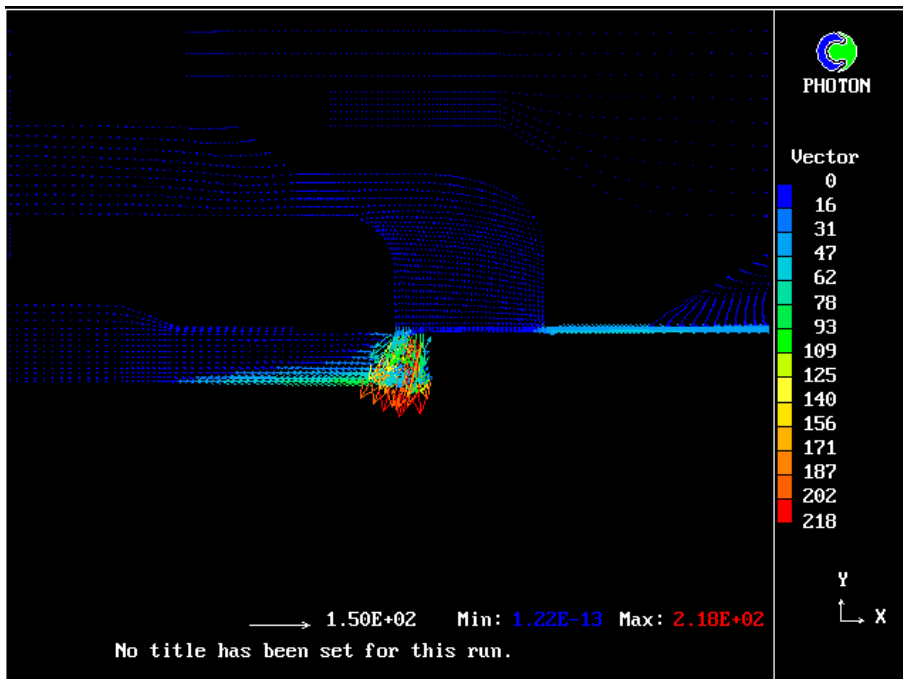
(a) time = 16 ms



(b) time = 16.5 ms

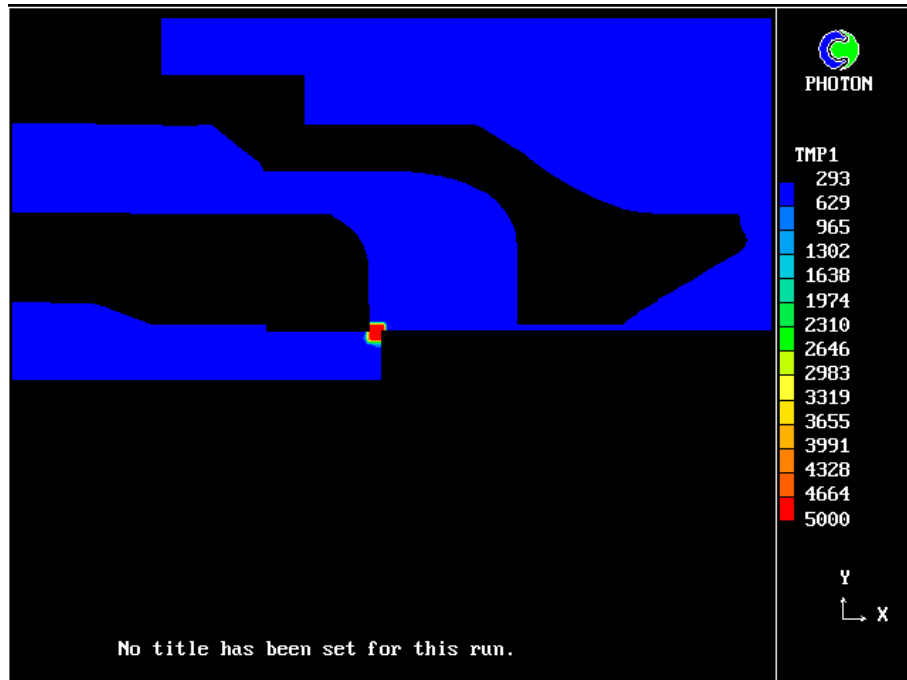


(c)time = 17 ms

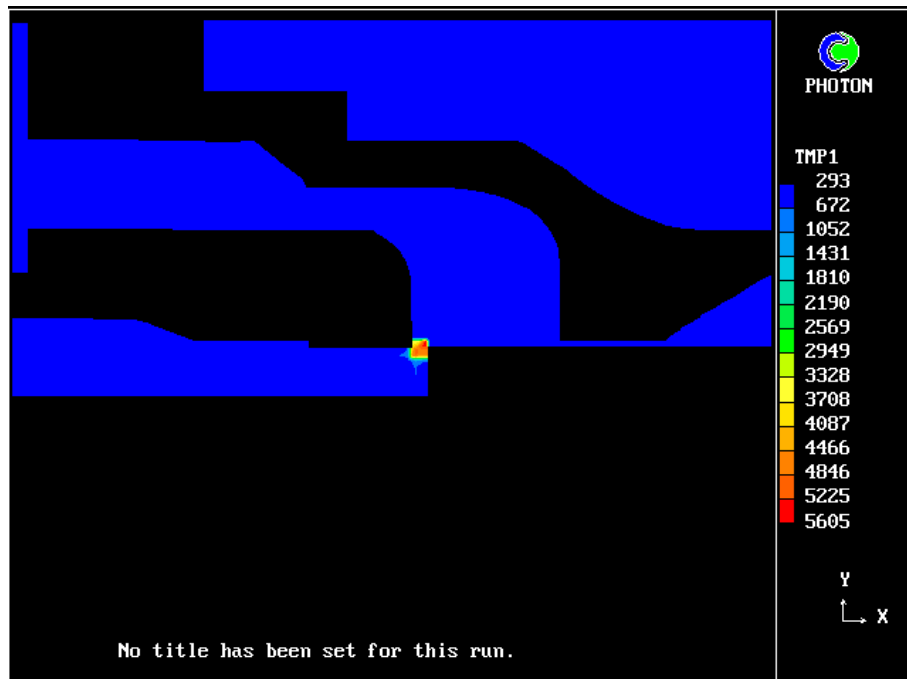


(d)time = 17.5 ms

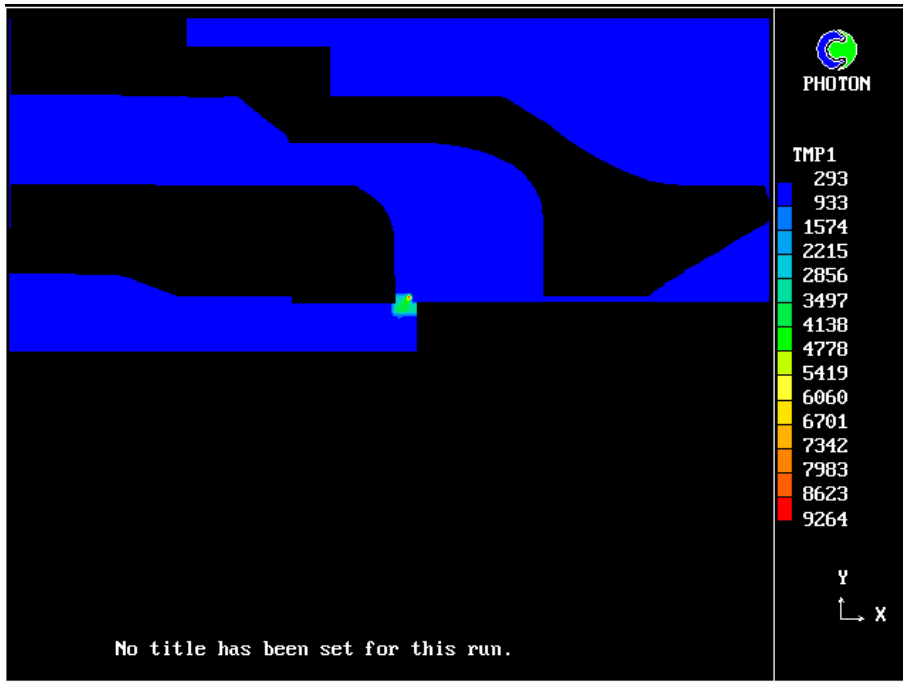
Fig. 4 Velocity distributions in the GCB.



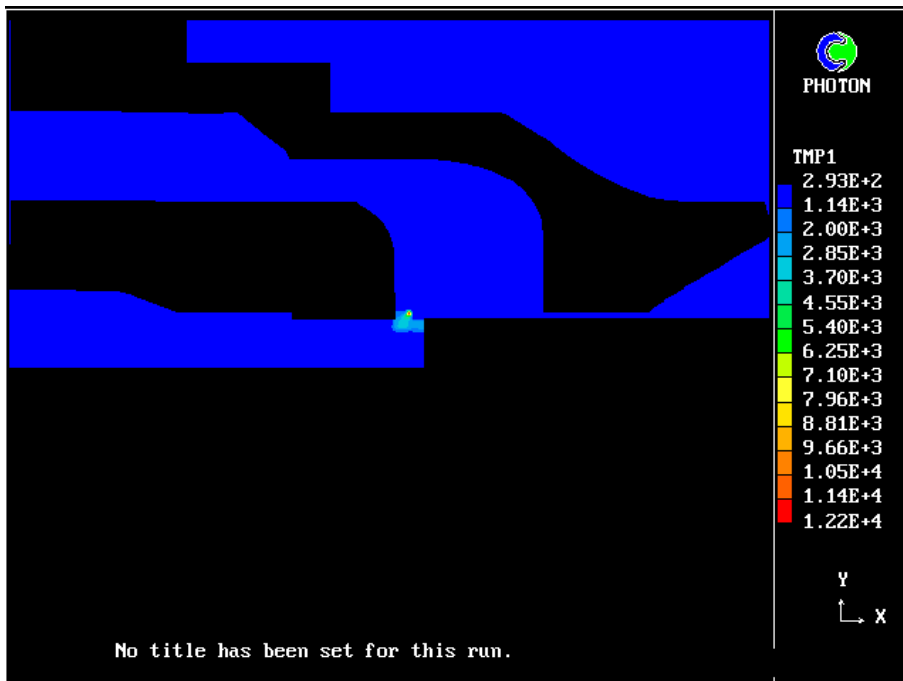
(a)time = 16 ms



(b)time = 16.5 ms



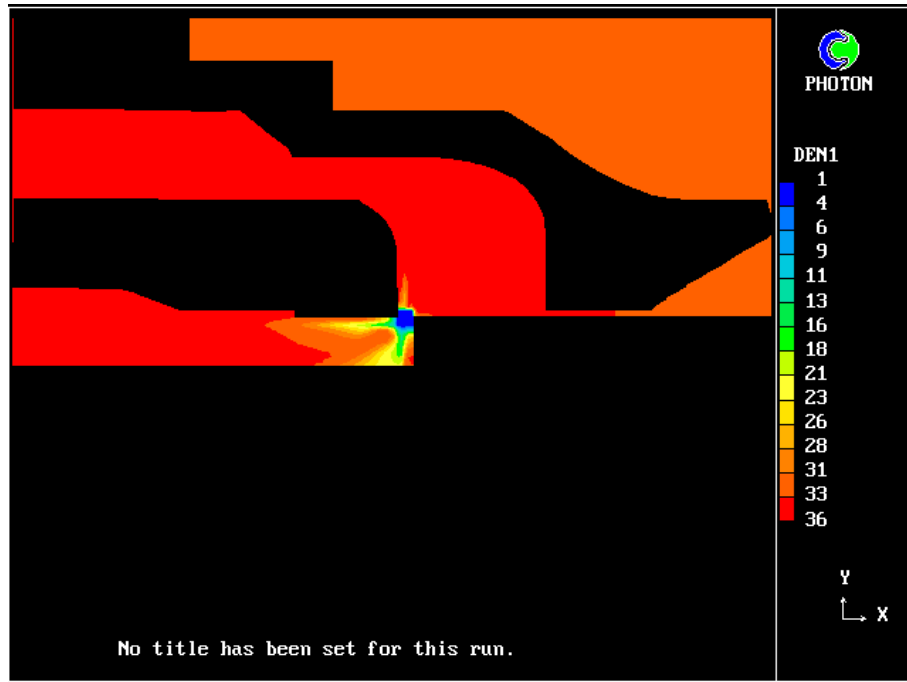
(c)time = 17 ms



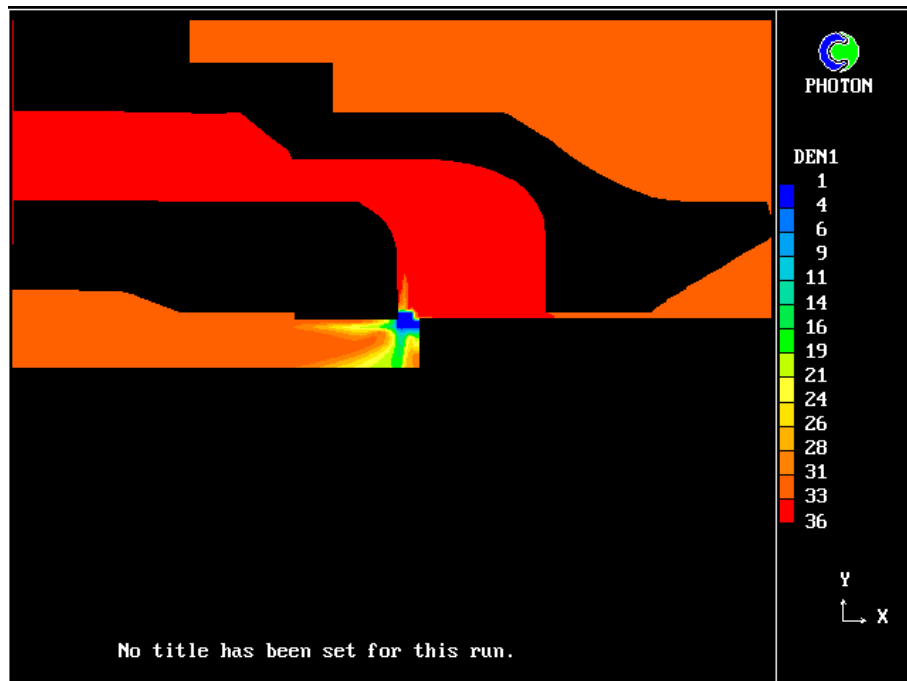
(d)time = 17.5 ms

Fig. 5 Temperature distributions in the GCB.

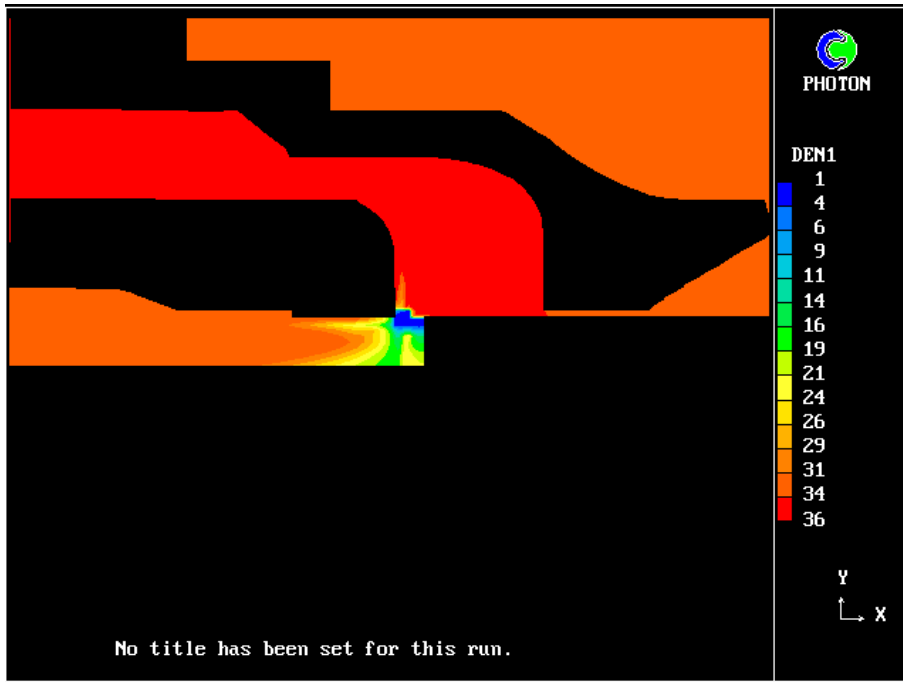




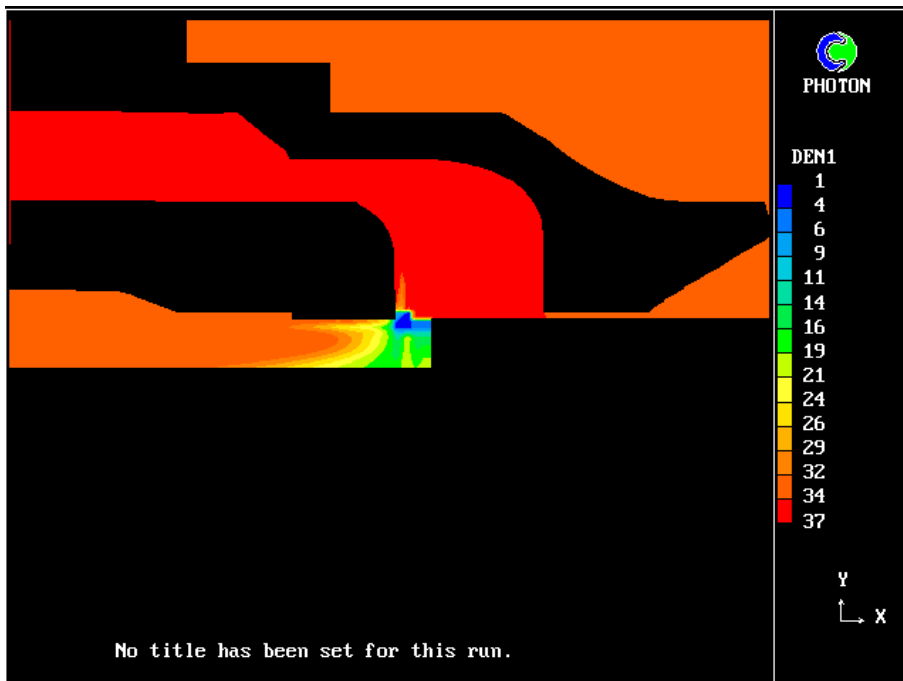
(a)time = 16 ms



(b)time = 16.5 ms



(c)time = 17 ms



(d)time = 17.5 ms

Fig. 6 Density distribution in the GCB.

### 3. 결론

이상과 같이 실제와 동일하게 차단부의 이동을 모의하여 차단부내의 열유동해석 기법과 결과를 제시하였다. 이미 언급했듯이 차단부내의 유동해석은 무부하상태의 냉가스 유동해석과 아크를 포함한 열유동해석으로 나누어진다. 냉가스 유동해석에서는 소호부내의 가스밀도, 온도, 압력분포, 속도분포 등을 계산하여 노즐 및 접점의 형상, 실린더 출구의 형상, 실린더용량 등에 대한 연구에 활용하며, 특히 진상소전류의 차단특성을 개선시키기 위해 널리 사용되고 있다<sup>(5)</sup> 아크를 포함한 열유동해석은 이러한 냉가스 유동해석을 바탕으로 이루어진다.

본 연구에서는 실제 SF6가스의 물성치를 데이터 베이스화하고 아크계산모델을 상용코드인 PHOENICS에 삽입하여 차단부내 열유동해석을 하였다. 이 경우 차단동작시의 열가스 거동 예측이 가능해지므로 차단부의 설계시에 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 산업자원부 지원 중기거점 기술개발 과제인 “초고압 전력기기 기초 설계기술 개발”의 위탁기술개발과제로 수행한 연구결과입니다.

### 참고문헌

- (1) Fang, M.T.C. and Yan, J.D., 1997, "Common problems in computer sim Blast Arcs", *3rd international conference ECAAA 97*, Vol. 1, pp. 1~7.
- (2) Zhang, X.D., Trepanier, J.Y. and Camarero, R., 1994, "Modelling and arc-flow interaction in circuit-breakers", *Comp. Fluid Dyn.*, Vol. 2, pp. 41-64.
- (3) 최영길, 송기동, 박경엽, 신영준, 1995, "800kV 가스차단기의 차단성능평가를 위한 수치 적용", *대한전기학회하계학술대회논문집 C*, pp. 1888~1891.
- (4) 송기동, 최영길, 박경엽, 신영준, 1997, "열팽창분사식 차단부내의 열가스 유동해석", *전기연구회 춘계학술 발표회 논문집*, pp. 80~85.
- (5) 송기동, 박경엽, 신영준, 1995, "극간절연회복향상을 위한 초고압 GCB의 노즐형상설계" *한전기학회 추계학술대회*, pp. 479~481.