

초고압 복합소호 차단부의 열가스 거동 예측

김진범[†]·여창호^{*}·서경보^{*}·권기영^{**}·이학성^{***}

Prediction of Hot Gas Behavior in High Voltage Self-blast Circuit Breaker

Jin-Bum Kim, Chang-Ho Yeo, Kyoung-Bo Seo, Ki-Yeoung Kweon
and Hahk-Sung Lee

Key Words: Self-blast circuit breaker(자력소호 가스 차단기), ablation(용삭), electric field(전기장), SF₆-PTFE mixture vapor(PTFE-SF₆ 혼합 가스)

Abstract

Self-blast circuit breakers utilize the energy dissipated by the arc itself to create the required conditions for arc quenching during the current zero. The high-current simulation provides information about the mixing process of the hot PTFE cloud with SF₆ gas which is difficult to access for measurement. But it is also hard to simulate flow phenomenon because the flow in interrupter with high current, SF₆-PTFE mixture vapor and complex physical behavior including radiation, calculation of electric field. Using a commercial computational fluid dynamics(CFD) package, the conservation equation for the gas and temperature, velocity and electric fields within breaker can be solved. Results show good agreement between the predicted and measured pressure rise in the thermal chamber.

기호설명

J : 전류밀도, Current density(A/m)

B : 자속밀도, Magnetic flux density(T, N/Am)

1. 서 론

차단기는 고장전류를 신속하고 정확하게 차단하여 계통 및 전력기기들을 보호하는 필수기기이다. 이러한 차단기는 조작방식 및 내부 매질에 따라 여러 가지 타입으로 나누어지며 그중 SF₆가스가 소호매질로 가장 많이 사용되어지고 있다.

여러 가지 타입의 차단기 중에서 SF₆가스를 매질로 이용하는 단순 과퍼식 차단기가 초고압용으로 널리 이용되고 있지만 최근에는 아크 에너지를 소호에 이용하는 효율 높은 복합소호 차단부가 개발되어 여러 기종의 차단기에 적용되고 있다.[1]

본 논문에서 다루게 될 복합소호 차단부는 이상신호에 의해 이송부가 이동을 시작하며 이때 아크 플라즈마가 발생하게 된다. 아크에 의해 발생된 에너지는 매질인 SF₆가스를 고온의 상태로 만들며 이 고온의 에너지는 내부 노즐을 용삭(ablation)시키게 된다. 이때 발생된 온도는 25,000K 내외이며 이러한 현상이 불과 수밀리초(milli-second)내에 발생하므로 실험 및 수치적으로 현상을 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다.[2]

하지만 차단부의 복잡한 물리적 현상을 실험적인 규명과 수치적으로 모사를 하기 위해 지난 수십년간의 많은 시도가 있었다.

† (주)효성 중공업연구소 선임연구원
E-mail : cine2000@hyosung.com
TEL : (055)268-9978 FAX : (055)268-9926

* (주)효성 중공업연구소 연구원

** (주)효성 중공업연구소 수석연구원

*** (주)효성 중공업연구소장

Ushio[3]는 복합소호차단기에서 파퍼실린더 유무에 따른 영향을 실험적으로 접근하여 대전류차단에서 파퍼실린더 없이 소호가 가능한 것을 증명하였으며, Claessens[4][5]는 전자기장을 고려하지 않고 CFD기법을 이용하여 전류를 열원으로 환산, 해석하여 실험데이터와 비교해 만족할 만한 결과를 보여주었다.

최근에 들어 Fang[6][7] 등은 전계해석을 기존의 열유동해석과 연성하여 해석을 하였다. 이들은 아크에너지 및 열에너지로 인한 용삭, SF₆가스의 이온화, SF₆-PTFE 혼합가스의 특성 등을 해석에 반영하여 실제 물리적 현상에 가깝게 접근하였다. 이를 위해 온도 및 압력에 따른 SF₆가스의 물성치를 고려하였고, 지배방정식은 연성으로 해석한 전계값으로부터 로렌츠힘(Lorentz force) 및 전기저항열(Ohmic heating)을 소스로 사용하였다.

해석시 SF₆가스 온도가 아크에 의해 매우 높게 상승하고 이온화 되므로 이상기체 방정식을 적용하거나 단순 선형으로 보간을 하게 되면 해석상 많은 에러가 발생하게 되어 올바른 예측을 할 수 없게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 온도 및 압력에 따른 방대한 SF₆가스의 물성치 데이터가 필요하다.[8]

본 연구에서는 SF₆가스의 물성치를 해석 영역 내에서 계산이 가능하도록 데이터베이스화하였으며 전기장과 열유동의 연성해석이 가능한 상용코드인 PHOENICS[9]를 사용하였다. 이러한 연성해석은 열원을 먼저 계산하여 경계조건이나 초기조건에 삽입하는 것과는 달리 그 정확도와 모사 능력이 뛰어나며 하나의 해석영역을 공유하므로 해석시간을 줄일 수 있는 장점이 있다.

해석 결과의 검증을 위해 245kV 40kA의 기종을 선정하여 실험데이터와 비교하여 보았다.

2. 이론 및 경계조건

전계값에서 얻어진 로렌츠힘(Lorentz force) 및 전기저항 열(ohmic heating)을 차단부 내부에 적용하기 위해서는 기존의 Navier-Stokes방정식과는 달리 운동량 방정식에는 로렌츠 힘을, 에너지 방정식에는 전기저항이 첨가한 수정된 방정식을 사용해야 한다.

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

여기서 ϕ 는 독립변수이며 ρ 는 SF₆가스의 밀도, \vec{V} 는 속도벡터를 나타낸다. 변형된 Navier-Stokes 방정식에서 소스항인 S_ϕ 와 확산계수인 Γ_ϕ 에 대한 값은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Source term and diffusion coefficients for governing equation

Equation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
continuity	1	0	0
z-momentum	w	$\mu_l + \mu_t$	$-\partial P/\partial z + J_r B_\theta$ +viscous term
r-momentum	v	$\mu_l + \mu_t$	$\partial P/\partial r - J_z B_\theta$ +viscous term
enthalpy	h	$(k_l + k_t)/c_p$	$\sigma E^2 - q + dP/dt$ + viscous dissipation

식(1)의 소스항 값을 얻어내기 위해서는 전기장을 풀어야 하는데 본 연구에서는 50Hz의 방출 아크를 다루었다.

전류연속방정식(current continuity equation)과 단순화된 옴의 법칙(Ohm's law)은 각각 식(2), (3)과 같으며, 전기장은 정전기학의 포텐셜 구배 (gradient of electrostatic potential, $\vec{E} = -\nabla\psi$)와 관련이 있으므로 식(4)와 같이 하나의 방정식으로 사용될 수 있다. 여기서 σ 는 전기전도도(electric conductivity, mho/m)이다.

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \psi) = 0 \quad (4)$$

유동부분만을 계산하기 위해 사용되어지는 계산영역은 유체영역과 이에 영향을 미치는 고체영역을 포함하지만, 본 연구에 사용된 전자기장과의 연성을 위해서는 이보다 더 큰 계산영역을 필요하게 된다. 전자기장은 해석이 시작되면서 전체 계산영역을 사용하게 되고 이 계산 결과가 실시간으로 열원을 계산하기 때문이다. 따라서

전자기장과 열유동을 포함한 계산영역은 상호 계산에 영향을 미치지 않도록 충분히 키워야 하며 본 논문에서는 지면상 표현하지는 않았고 계략도를 Fig.1에 나타내었다. 또한 Fig.1은 아킹 시간 (arcing time)에 따른 고정자의 이동위치를 나타내고 있다.

경계조건은 r-방향으로 $\partial \Psi / \partial r = 0$, 출구에서 $\partial \Psi / \partial z = 0$ 으로 두었다. 내부 도체의 전기 전도도는 $10^6(\Omega \cdot m)^{-1}$ 로 설정하였으며 특히 전기전도도가 0이 되는 지점은 해석상 안정성을 위해 매우 작은 값인 $10^{-3}(\Omega \cdot m)^{-1}$ 로 가정하였다.

차단기 내부는 SF₆가스가 절대압 6.5bar로 채워져 있고 유동장 영역에서의 좌우 출구의 압력 조건을 두어 가스의 입출입이 자유롭게 하였다. 측정되는 정량적 데이터로는 열챔버 내의 압력과 온도가 있으며 챔버 내의 평균값을 취하였다.

전체 아킹시간(arcing time)은 21.0ms로 하였으며 전류영점(current zero) 근방에서 열챔버 내의 압력상승과 온도, 가스의 거동까지 확인할 수 있도록 하였다. 전류영점 이후 열챔버내의 압력강상을 파악하기 위해 전체 계산시간은 25.0ms로 하였다.

이때 해석에 사용된 시간은 Pentium4 3.0GHz CPU와 3.0GB의 메모리를 사용하여 비정상해석을 하는데 약 30시간이 소요되었다.

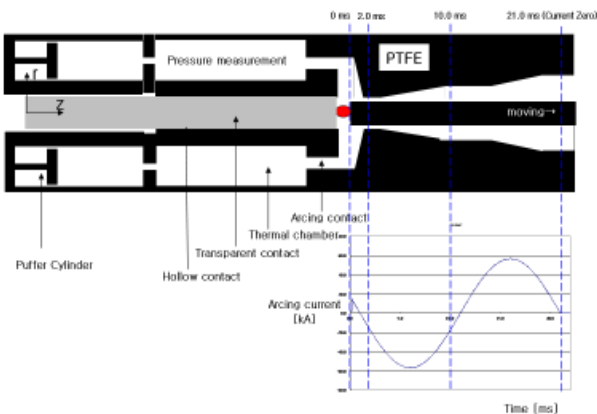


Fig. 1 Geometry of the thermal chamber of a 245kV, 40kA Self-blast circuit breaker

3. 복사 열전달 및 난류조건

Table 1의 에너지 방정식에서 q 는 단위시간과

단위부피당 복사로 인한 손실을 나타낸다. 본 연구에서는 q 값을 구하기 위해 Fig.2와 같이 원주방향으로 매우 단순한 온도분포를 갖는 모델을 사용하였다. 이 모델은 아크로 인해 발생하는 최대 온도를 T_{max} 로 두었을 때, 아크 영역을 $0.83T_{max}$ 로, 아크 반경은 4,000K의 등온위치까지로 정의한다. 이때 손실값 q 는 주변 가스의 온도와 압력, 아크 반경의 함수이다.

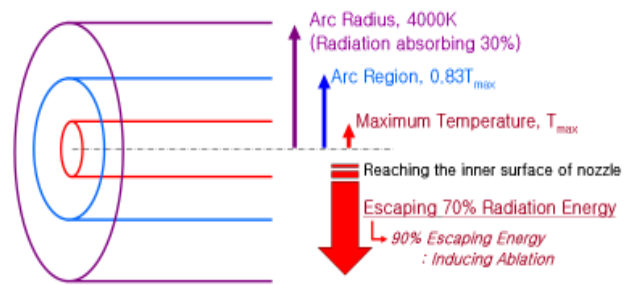


Fig. 2 Simple radiation model for Self-blast circuit breaker

아크의 복사 에너지는 아크 중심에서 반경까지 30%를 흡수하고, 빠져나온 나머지 70%의 복사 에너지는 차단기 내부의 노즐 벽면에 도달한다고 가정하였다. 이 복사에너지중의 90%가 PTFE노즐의 용삭을 일으키는 에너지원이 된다.

복사에 의한 노즐의 용삭은 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$Q = \bar{m} h_v \quad (5)$$

여기서 Q 는 내부 노즐의 면에 도달하는 단위 길이당 복사에너지이며, \bar{m} 은 단위 길이당 용삭율이다. h_v 는 PTFE의 분자고리를 끊어 증기로 만드는데 필요한 에너지이다. PTFE의 고분자 고리를 끊는데 필요한 내부온도는 3,400K이며 동일한 에너지로는 $1.19 \times 10^7 J/kg$ 이다. 이와 같은 에너지로 PTFE의 고리를 끊게 되고 용삭가스가 분출하게 된다.

한편 유동해석에 사용된 난류모델은 Zero-equation 모델인 Prandtl mixing length model로 이전의 차단기 내부 해석에 사용되어 정확성이 검증[10]되었으며 또한 계산시간의 효율성을 위해 사용하였다.

4. 해석결과

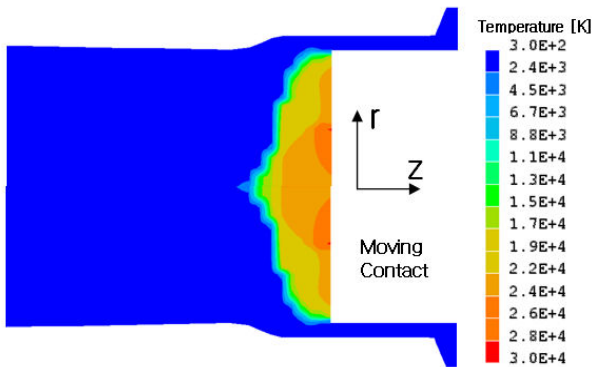
실제 차단부에서는 Fig.1에서의 'Moving'으로 표현된 영역이 고정자가 되고 나머지 영역이 이동을 하게 된다. 하지만 해석의 편의성을 위해 고정자가 이동하는 것으로 가정하였다. 또한 아크 전류크기에 따라 초기 아크영역, 전류가 최대가 되는 대전류 영역, 영점에 도달하는 전류 영점 영역, 이렇게 세 부분으로 나누어 보았다.

4.1 아크 발생 초기영역(Initial Current Arc Phase)

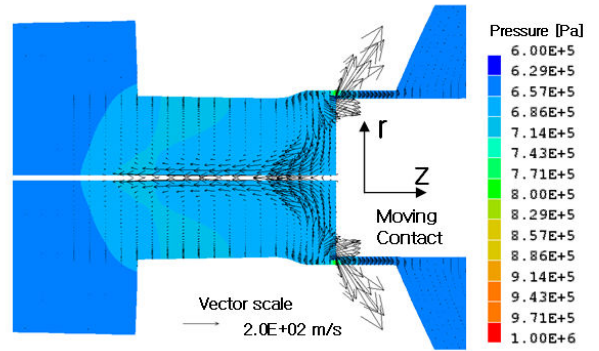
이상신호가 감지되게 되면 이송부가 움직이기 시작하며 고정부와 아크접속부(arcng contact)의 점점이 분리되게 되면서 아크가 발생하게 된다.

하지만 실제 계산에서는 아크 점점이 분리되는 시점부터 해석하기가 곤란하므로 두 점점 사이가 2.0mm 정도 분리되어 있다고 가정하여 계산을 시작하였으며, 이 때 초기 0.15ms 동안 초기 전류값을 2.0kA로 시작하고 그 후에 14.8kA로 전류 정현파를 입력하였다.

로렌츠 힘은 아크에 큰 영향을 미치게 되며 이로 인하여 내부 유동에 영향을 준다. 0.15ms이후의 갑작스런 전류값 상승은 전기 저항으로 인해 주변 온도를 급상승시키며 shock wave와 같은 내부 유동의 급격한 변화로 이어진다.



(a) Temperature contours at arcing time 0.3ms, 12.2kA



(b) Pressure contours and velocity vectors at arcing time 0.3ms, 12.2kA

Fig. 3 Behavior of gas at 0.3ms with arcing current 12.2kA

Fig.3과 같이 아크 초기 영역인 아킹시간이 0.3ms에서 접속부주변의 온도가 약 28,000K까지 상승하며 국소적으로 마하수 1.5정도에 해당하는 최고 약 3,000m/s의 유속을 보여주고 있다.

4.2 대전류 아크 영역(High Current Arc Phase)

아킹시간이 22ms이고 전류가 50Hz의 정현파이므로 7.0ms와 17.0ms에서 전류는 최고점에 도달하게 된다. 아크는 전류로부터 에너지를 공급받게 되므로 대전류 아크 영역에서 아크의 영역이 크게 발달하게 되어 차단기 내부의 유동은 Fig. 4와 같이 매우 복잡해진다.

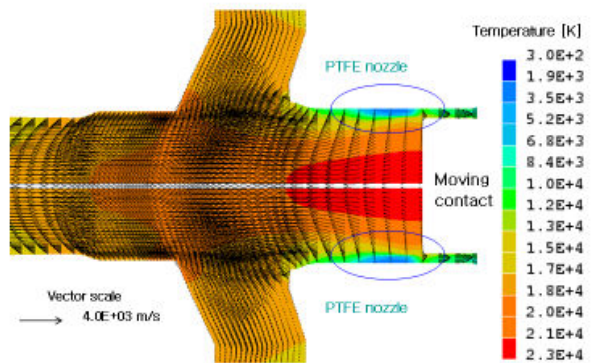


Fig. 4 Temperature contours and velocity vectors at arcing time 6.0ms, -56.6kA

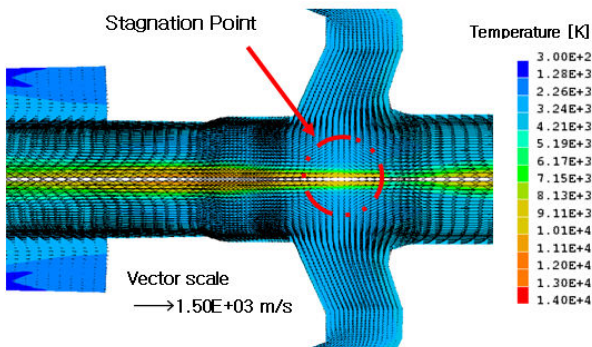
짧은 시간에 20,000~30,000K의 고온 영역이 폭넓게 위치하므로 유동은 급격하게 변하며 고온의 열 및 아크에 의한 복사에너지로 인해 Fig.4의 PTFE 노즐 주변에서와 같이 용삭이 발생하게 된

다. 노즐부 주변 정체 및 열가스에 의해 압력상승이 발생하며 접촉부 주변에서 압력이 19bar, 최고 유속이 4,000m/s에 이르게 된다. 이렇게 발생된 고온고압의 가스는 해석영역의 경계조건인 양쪽 끝부분의 압력조건(6.5bar)이 있는 곳으로 대부분 빠져나가지만, 상대적으로 압력이 낮은 열챔버로 일부 가스가 유입된다. 또한 노즐 주변에서 발생된 PTFE 용삭 증기(PTFE-SF₆ gas)는 열챔버의 압력 상승을 더욱 가속화 시킨다. 전류 최고점에 이르러서는 노즐 주변의 압력이 30bar까지 상승하고 고정자가 노즐목(Nozzle throat)을 빠져나가는 시점에서는 강한 충격파가 발생하게 된다.

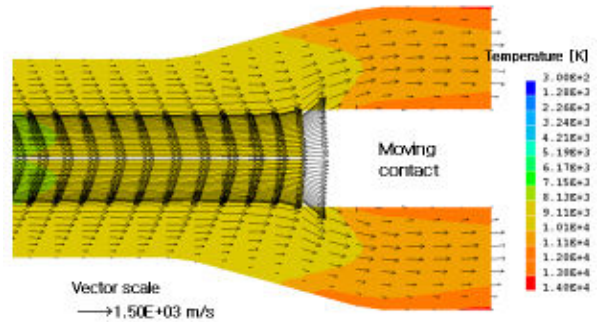
4.3 전류 영점 영역(Current Zero Phase)

22ms의 아킹 시간동안 전류 최고치를 두 번 지나게 되고 전류는 점점 작아져 전류 영점(current zero)에 도달하게 된다. 전류값이 작아지면서 아크의 영역 또한 줄어들게 되고 차단부 주변 유동에서는 아크에 의한 영향이 감소하게 된다.

대전류 영역에서 높은 압력으로 인해 열챔버로 유입되던 유동형태는 아크에너지가 감소하게 되고 열챔버 내의 압력이 오히려 차단부 주변의 압력보다 높아지면서 Fig.5와 같이 차단부로 분출하게 된다. 또한 열챔버의 분출압과 아크에 의한 압력상승이 정체점(stagnation point)을 만들며 초기에는 이동하는 고정자 주변에서 발생하다가 전류가 영점이 되면서 열챔버의 토출구로 점차 이동을 하게 된다. 이런 열챔버의 분출가스는 차단부에 비해 상대적으로 매우 낮은 온도와 높은 밀도를 가지고 있어서 아크 소호(quenching)에 결정적인 역할을 한다.



(a) Temperature contours and velocity vectors around arcing contact



(b) Temperature contours and velocity vectors around moving contact

Fig. 5 Temperature contours and velocity vectors at arcing time 22.0ms, current zero(0.0A)

열챔버의 가스 상태는 아크소호에 매우 중요한 역할을 하므로 챔버내 압력을 높이고 가스를 혼합하는 것은 매우 중요하다. 이러한 챔버내 가스의 상태를 결정하는 중요한자로는 챔버형상, 노즐 및 초크경, 채널길이 등 매우 많은 요소가 있으며 이러한 형상을 조절하여 설계하는 것이 차단부 설계의 핵심이다.

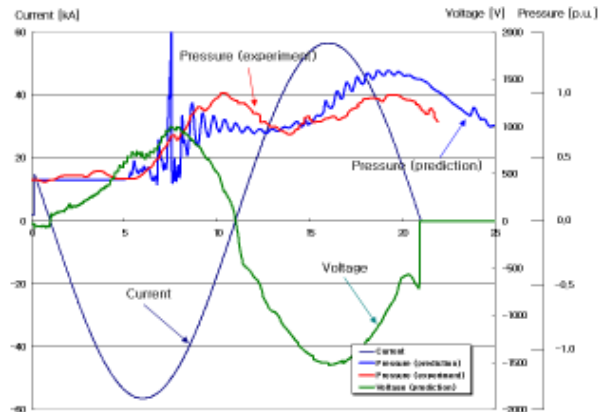


Fig. 6 Predicted pressure variation on thermal chamber of 245kV 40kA self-blast circuit breaker

Fig.6은 실험과 해석의 데이터를 비교한 값으로 아킹 시간에 따른 열챔버 내의 압력 및 접촉부에서의 전압을 나타내었다. 챔버내 압력의 최고점에서 약 10% 내외로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

실제 차단부는 고압의 SF₆가스로 채워져 있고 두꺼운 철판으로 완전히 밀폐 되어있어, 수 밀리 초 내에 발생하는 차단에 따른 급격한 가스의 거동을 관찰하는 것은 불가능하다. 이런 구조로 인해 차단기 내부의 유동을 해석하려는 많은 시도가 있었지만 이를 모사하기 위한 단순 열원계산 방법으로서의 접근법은 차단부 내의 유동의 정확한 거동 예측은 어려움이 따른다. 따라서 차단부의 대전류 해석은 전자기장을 고려한 통합 해석이 필요하다.

본 연구로 열챔버 내의 압력상승에 영향을 미치는 설계인자들을 알 수 있었으며 또한 압력상승에 대한 메커니즘을 이해할 수 있었다. 또한 정량적으로 실험값과 비교해 비교적 만족할 만한 결과를 얻게 되었다.

개발된 프로그램은 향후 차단기 개발 및 설계에 이용될 경우, 비용 및 시간을 절감할 수 있을 것으로 예상된다.

한편 전류 영점이후에서의 차단성능을 예측할 수 있는 프로그램 모듈 개발이 이루어져야 하며 또한 차단기 전체에 대한 영향을 파악하기 위해 더 큰 해석영역이 필요하다. 이를 위해 기존의 다른 상용 Code와 연계하는 것이 향후 해결해야 할 과제이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 중기거점 기술개발 사업의 지원으로 수행중인 “245kV 40kA, Motor-Drive형 초고압 GIS 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) D. Dufournet, C. Linder, D. Johnson and D. Vondereck, "Technical trend in circuit-breaker switching technologies", *International Colloquium*, Paper 13. pp.78-85.
- (2) Georges Bernard, 1995, "Breaking by auto-expansion", *Cashier Technique Merlin Gerin n 171*, March 1995.
- (3) T. Ushio et al, 1981, "SLF Interruption by a gas circuit breaker without puffer action", *IEEE trans. on power apparatus and system*, Vol. PAS-100, No. 8, pp.3801-3810.
- (4) M. Claessens, K. Möller and H. G. Thiel, 1997, "Simulation of Gas Flow Phenomena in High-Voltage Self-Blast Circuit Breakers at Heavy Fault Current Interruption", *IEEE Trans. on Plasma Science*, Vol.25, No.5, pp.1001-1007.
- (5) M. Claessens, K. Möller and H. G. Thiel, 1997, "A computational fluid dynamics simulation of high- and low-current arcs in self-blast circuit breakers", *J.Phys.D:Phys.30(1997)*, pp.1899-1907.
- (6) J. D. Yan and M. T. C.Fang, 1999, "The Development of PC Based CAD Tools for Auto-Expansion Circuit Breaker Design", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.14, No.1, pp.176-181.
- (7) J. L. Zhang, J. D. Yan, A. B. Murphy, W. Hall and M. T. C. Fang, 2002, "Computational Investigation of Arc Behavior in an Auto-Expansion Circuit Breaker Contaminated by Ablation Nozzle Vapor", *IEEE Trans. on Plasma Science*, Vol.30, No.2, pp.706-718.
- (8) L. S. Frost and R. W. Liebermann, 1971, "Composition and transport properties of SF₆ and their use in a simplified enthalpy flow arc model", *Proc. IEEE*, Vol.59, pp.474-485.
- (9) Phoenix, CHAM, London, UK
- (10) J. D. Yan, K. I. Nuttall and M.T.C. Fang, 1988, "A comparative study of turbulence models for SF₆ Arcs in a supersonic nozzle", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 21