

## PTFE 용삭을 고려한 초고압 복합소호 차단기의 성능 예측

김진범\* · 권기영\*\* · 이학성\*\*\*

### Prediction of Performance considering Ablated PTFE in High Voltage Self-blast Circuit Breaker

Jinbum Kim\*, Ki-Yeoung Kweon\*\* and Hahk-Sung Lee\*\*\*

**Key Words** : Self-blast circuit breaker(자력소호 가스 차단기), Ablation(용삭), Electric field(전기장), Thermal chamber(열챔버)

#### 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. During the arcing period, high pressure, temperature and radiation of the arc could burn in pure SF<sub>6</sub> gas and PTFE nozzle. Ablated nozzle shape and SF<sub>6</sub>-PTFE mixture vapor affect the performance of an self-blast circuit breaker. After a number of tests, nozzle in circuit breaker is disassembled, a section of ablated nozzle is investigated precisely. Using computational fluid dynamics, the conservation equation for the gas and temperature, velocity and electric fields within breaker is solved. Before applying a section model, developed program is verified with experimental data. Performance of ablated nozzle shape is compared with original model through analysis program.

#### 1. 서론

전력용 차단기는 이상 전류를 신속하고 정확하게 차단하여 전력 계통 및 타 전력기기들을 보호하는 필수기기이다. 이러한 차단기의 종류는 조작방식 및 내부 매질에 따라 분류된다. 이중 SF<sub>6</sub>를 매질로 하는 단순 파괴식(Puffer type)이 가장 많이 이용되고 있으나 차단부 자체에서 발생하는 아크 에너지를 이용하는 고효율의 차단부가 개발되어 여러 기종의 차단기에 적용하고 있다.

복합소호 차단기는 아크 에너지를 전류영점 동안 아크 소호에 필요한 압력상승을 일으키는데 이용함으로써 조작력의 부담을 덜어주는 자력 소호 방식이 초고압 차단기에 채용되었지만 순수 자력 소호 방식은 전류크기가 작은 경우 즉 소전류 차단 성능에 단점을 가지고 있어 이를 보강하기 위해 작은 체적의 실린더를 병용하여 소전류 차단시에는 파괴 실린더가 소호 역할을 분담하고 대전류 차단은 열 팽창실이 담당하는 일명 “복합 소호 차단 방식” 차단부가 제 3세대 차단부로서 등장하였다.

복합소호 차단부의 성능에 영향을 미치는 요소는 매우 많다. 노즐의 형상 하류 및 상류장의 지름, 열챔버의 형상 및 채널의 직경, 이동전극의 속도 등이 있다. 이중에서 노즐의 형상이 매우 중요한데 아크가 발생하여 고온 고압이 가스를 열챔버로 유도하는 역할을 하기 때문이다. 따라서 복합소호 개발자는 노즐의 형상 결정에 많은 시간을 할애하게 된다.

차단에 있어서 아크가 발생하는 시간이 수십마이크로

(mili-seconds)라는 짧은 시간 내에 발생을 하게 되지만 아크 중심부의 온도가 25,000~30,000K의 고온이 발생하게 되고 주변 온도를 급상승 시킨다. 게다가 강한 복사에너지로 인해 주변 재질을 용삭시킨다.[1]

지금까지의 차단부 관련 논문은 초기 설계 형상으로 성능을 예측하는 것이 대부분이었지만 본 연구는 계속되는 차단으로 인하여 용삭이 발생하여 초기 형상이 변형되었을 경우, 차단 성능이 초기 성능만큼 진행되지 않는다는 것에 착안을 해, 이러한 변형에 따른 차단부 성능 변화에 대해 연구를 진행하였다.

#### 2. 이론 및 경계조건

본 연구를 진행하기 위해서는 기존 지배방정식만을 적용해서는 해결할 수 없다. 열유체와 전계방정식이 동시에 적용되어야 하기 때문이다. 전계값에서 얻어진 로렌츠힘(Lorentz force) 및 전기저항 열(ohmic heating)을 차단부 내부에 적용하기 위해서는 기존의 Navier-Stokes방정식과는 달리 운동량 방정식에는 로렌츠힘을, 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  $\phi$ 는 독립변수이며  $\rho$ 는 SF<sub>6</sub>가스의 밀도,  $\vec{V}$ 는 속도 벡터를 나타낸다. 변형된 Navier-Stokes 방정식에서 소스항인  $S_\phi$ 와 확산계수인  $\Gamma_\phi$ 에 대한 값은 Table 1에 나타내었다.

\* (주)효성 중공업연구소, cine2000@hyosung.com

\*\* (주)효성 중공업연구소, kykweon@hyosung.com

\*\*\* (주)효성 중공업연구소 연구소장, hslee@hosung.com

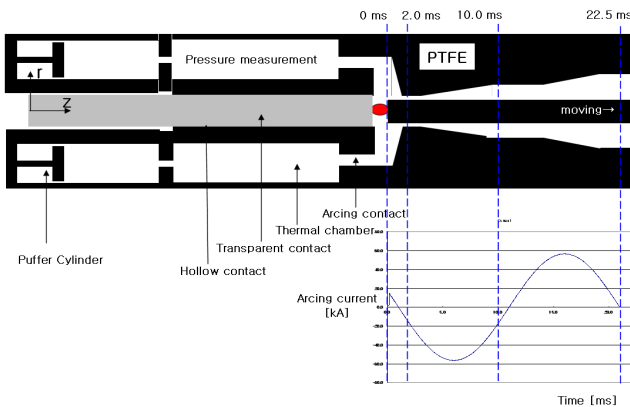
**Table 1** Source term and diffusion coefficients for governing equation

Equation	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
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.

차단기 내부는 SF<sub>6</sub>가스가 절대압 6.5bar로 채워져 있고 유동장 영역에서의 좌우 출구는 압력 조건을 두어 가스의 입출입이 자유롭게 하였다. 측정되는 정량적 데이터로는 열챔버 내의 압력과 온도가 있으며 챔버 내의 평균값을 취하였다. 또한 SF<sub>6</sub>가스의 거동을 모사하기 위해 온도 및 압력에 따른 시험 물성치가 사용되었다.[2]

전체 아크시간은 22.5ms로 하였으며 전류영점(current zero) 근방에서 열챔버 내의 압력상승과 온도, 가스의 거동까지 확인할 수 있도록 하였다. 전류영점 이후 열챔버내의 압력하강을 파악하기 위해 전체 계산시간은 25.0ms로 하였다.



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

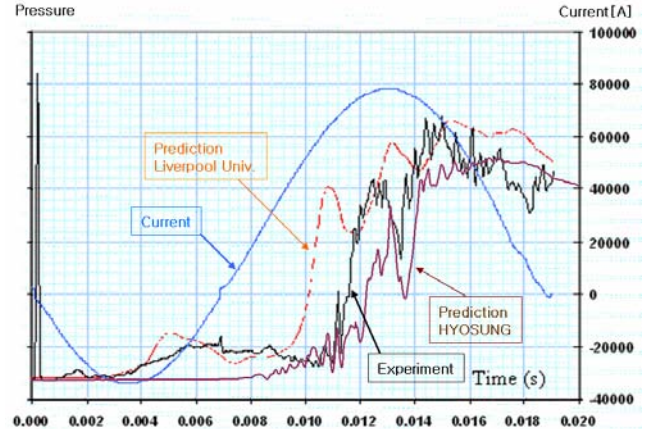
Table 1의 에너지 방정식에서 q는 단위시간과 단위부피당 복사로 인한 손실을 나타낸다. 본 연구에서는 q값을 구하기 위해 원주방향으로 매우 단순한 온도분포를 갖는 모델을 사용하였다. 이 모델은 아크로 인해 발생하는 최대 온도를 T<sub>max</sub>로 두었을 때, 아크 영역을 0.83T<sub>max</sub>로, 아크 반경은 4,000K의 등온위치까지로 정의한다. 이때 손실값 q는 주변 가스의 온도와 압력, 아크 반경의 함수이다.

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 PTFE 노즐의 용삭을 일으키는 에너지원이 된다.

난류모델은 Zero-equation 모델인 Prandtl mixing length model로 이전 연구에서 차단기 내부 해석에 사용되어 정확성이 검증되었으며 또한 계산시간의 효율성을 위해 사용하였다.

### 3. 해석 결과

개발된 프로그램을 본 연구에 적용하기 전에 신뢰성을 검증하였다. 이전[3]의 검증과는 달리 새 검증모델은 245kV 40kA의 복합소호 모델로 전류의 최고치와 최저치가 동일한 전류를 투입한 것이 아닌 비대칭의 DC전류로 시험된 것으로 영국의 Liverpool 대학에서 프로그램을 증명하기 위해 사용된 데이터를 근거로 본 연구에서도 동일 모델 및 데이터를 사용하여 프로그램을 검증해 보았다.

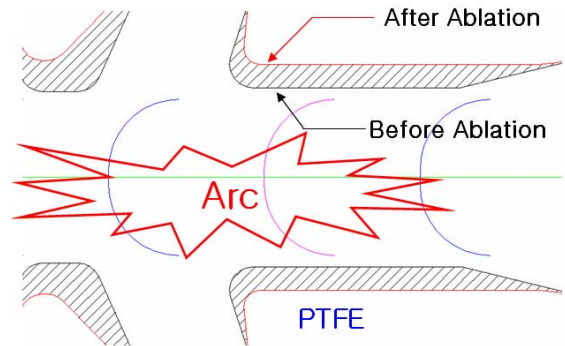


**Fig. 2** Predicted pressure verification on thermal chamber

Fig.2에서 Liverpool 대학의 계산결과는 열챔버 내의 최대 압력 위치를 비교적 잘 예측하고 있으나 압력 상승 예측지점 및 변동위치가 많이 어긋나고 있음을 알 수 있다. 본 연구를 통해 개발된 프로그램은 최대 압력과 약 10%의 오차를 나타내고 있으며 압력 상승지점 및 변동의 위치를 비교적 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 프로그램을 이용하여 연구를 진행하는데 있어 무리가 없다는 판단하여 당시의 모델을 이용하여 수치해석을 진행하였다.

연구에 사용된 245kV 40kA의 복합소호 모델은 당시에서 고유하게 개발된 독자모델로 수많은 시험을 거치면서 아크에 의해 노즐이 용삭이 되었다. 이렇게 용삭으로 변형된 PTFE 노즐을 분리하여 절단 뒤, 형상을 측정하여 해석을 적용하였다.

Fig.3에서 검은 해칭면은 아크에 의해 용삭된 면을 나타낸다.



**Fig. 3** Comparison of geometry after ablation

차단기 해석은 아크 전류 크기에 따라 초기 아크영역, 전류가 최대가 되는 대전류 영역, 영점에 도달하는 전류 영점 영역, 이렇게 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 본 연구도 세가지 영역으로 나누어 보았다.

### 3.1 아크 발생 초기영역(Initial Current Arc Phase)

이상신호를 감지하게 되면 Fig.4와 같이 이송부가 축을 따라 이동을 하게 되며 고정부와 아크 접촉부의 접점이 분리되면서 아크가 발생하게 된다.

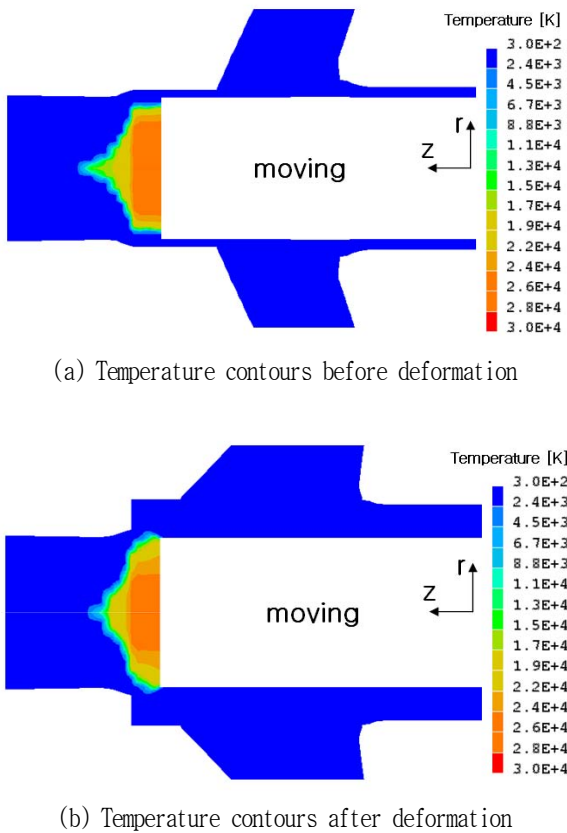


Fig. 4 Comparison of temperature contours at arcing time 0.3ms, 37.3kA

Fig.4는 아킹시간 0.3ms에서 용삭 전후의 온도분포를 나타낸 것이다. 접점이 분리되어 이동거리가 짧아 고온구간이 확산되지 않았지만 중심부의 온도는 약 26,000K를 나타내고 있다. 온도가 급상승함에 따라 SF<sub>6</sub>가스는 이온화가 진행되고 및 급팽창을 하며 확산되어진다.

이때 전자기장에서 방정식에서 계산되어 운동량 및 에너지 방정식으로 침부되는 로렌츠 힘 및 전기 저항열은 아크의 크기 및 온도 영역에 큰 영향을 미친다.

### 3.2 대전류 아크 영역(High Current Arc Phase)

전체 아킹시간이 22.5ms이므로 50Hz의 전류 정현파에서는 두 번의 최고점을 지나게 된다. 첫 번째는 7.5ms이지만 고정자의 짧은 이동거리 및 아크 및 고온의 가스에 의한 노즐주변의 유동 방해현상(nozzle clogging)이 발생하게 되어 열챔버의 압력 상승 영향은 미미하다. 하지만 Fig.5와 같이 두 번째 전류 최고점인 17.5ms를 지나는 지점에는 고정자가 충분히 이동을 하게 되고, 노즐 방해현상도 없어지면서 열가스의 거동이 매우 복잡하게 된다.

아크 에너지는 최고점에 이르게 되며 25,000K 이상의 고온 영역이 고정자와 이동자 사이에 이동한 거리만큼 폭넓게 위치하게 된다. 또한 열가스와 아크에 의한 복사에너지로 인하여 Fig.5에서와 같이 노즐 벽면에서는 용삭에 의해 PTFE 증기가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 PTFE 증기는 차단부 내부의

SF<sub>6</sub>가스와 혼합되어 SF<sub>6</sub>-PTFE와 같은 새로운 가스를 만들며, 이런 영향으로 열챔버의 압력을 상승시키게 된다. 또한 이와같은 과정의 반복으로 용삭은 더욱 진행이 가속화되어 노즐의 변형을 발생시키게 된다.

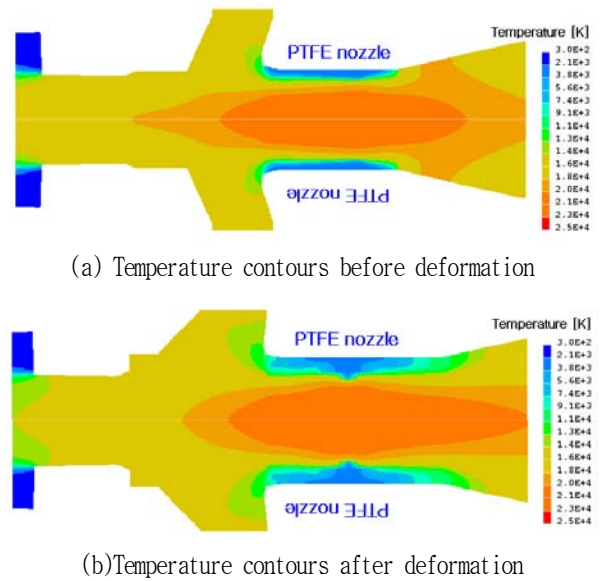


Fig. 5 Comparison of temperature contours at arcing time 17.5ms, 56.6kA

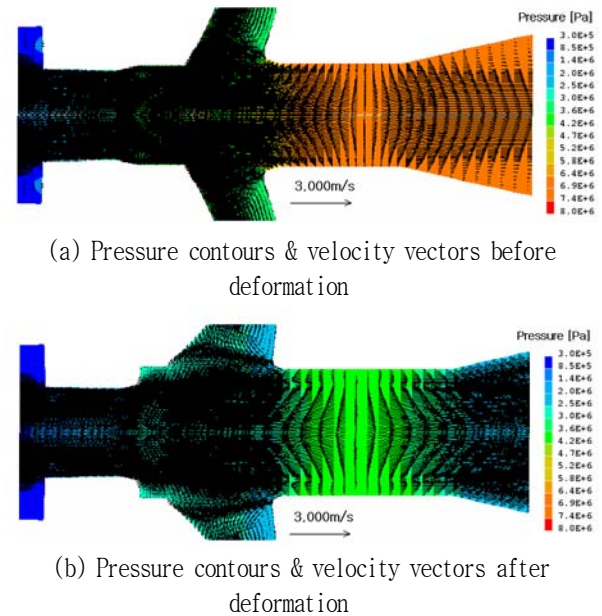


Fig. 6 Comparison of pressure contours & Velocity vectors at arcing time 17.5ms, 56.6kA

Fig.6에서는 압력과 속도벡터를 나타내는 것으로, 변형 후 압력을 비교해 보면 용삭으로 인해 노즐경이 늘어나 가스의 이동이 원활하게 이루어지면서 용삭 변형 전보다 압력상승이 낮음을 알 수 있다. 상대적으로 정체가 적은 변형된 모델이 유속이 빠르며 마하수 약 2.5이상을 나타내고 있다.

용삭으로 변형된 모델은 빠른 유속으로 노즐을 빠져나가고 있지만 이로 인해 열챔버로 유입되는 가스의 양은 적어져 결국 챔버내의 압력상승에는 악영향을 미치게 된다. 결국 가스의 유입이 적은 모델이 향후 전류영점영역에서 소호에 불리하게 작용하게 된다.

### 3.3 전류 영점 영역(Current Zero Phase)

아킹시간이 끝나는 22.5ms에서는 전류가 영점에 도달하게 되며, 전류에 의한 에너지 공급이 없어져 전기저항에 의한 열은 존재하지 않게 된다. 전류영점에 도달하면서 열챔버 내의 압력은 더 이상 상승이 되지 않고 열챔버로 유입되는 가스의 유동방향이 점차 바뀌게 되어 토출하기 시작한다.

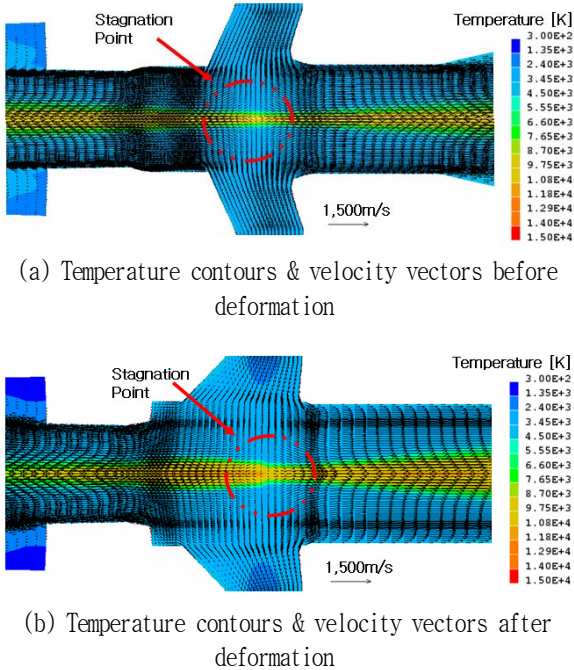


Fig. 7 Comparison of temperature contours & velocity vectors at current zero

정체점(stagnation point)은 아크의 중심에 존재해 있다가 아크에 의해 발생하는 가스의 팽창압보다 열챔버의 토출압력이 증가하면서 Fig.7과 같이 열챔버 토출구로 이동을 하게 된다. 대전류 영역에서 상대적으로 가스 유입이 낮았고, 또한 용삭으로 인해 노즐 직경의 변화로 인해 가스의 유동 및 온도분포가 변하게 된다. 아크 소호에 결정적인 역할을 하는 가스의 온도분포를 보면 중심부의 고온 영역이 낮고 이온화가 발생하지 않는 약 4,000K의 저온영역이 넓은 영역을 차지하고 있어서 변형전 모델이 상대적으로 유리함을 알 수 있다.

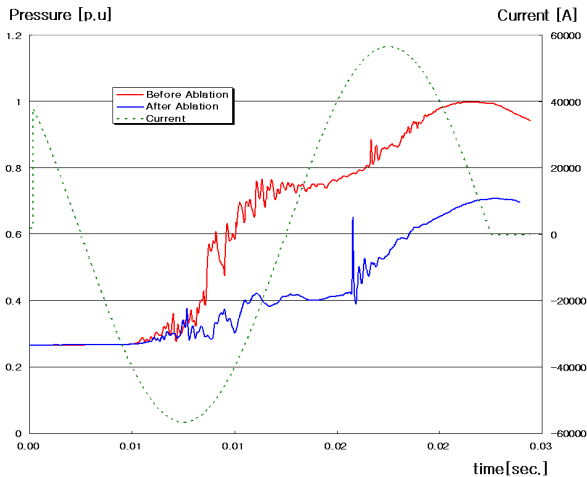


Fig. 7 Predicted pressure variation on thermal chamber of 245kV 40kA self-blast circuit breaker

Fig.7의 그림에서 아킹시간동안 열챔버 내의 압력상승을 비교해 보면 용삭에 의한 변형모델이 변형전 모델에 비해 약 35% 감소했음을 알 수 있다. 결국 열챔버의 압력은 아크차단에 중요한 요소인 차단부의 온도, 밀도에 매우 큰 영향을 미치므로 변형으로 인해 성능이 크게 바뀌었음을 예측할 수 있었다.

### 4. 결론

실제 차단부는 두꺼운 철판으로 완전히 밀폐되어있으며 음속의 2배에 이르는 유속으로 인해 관찰하는 것은 불가능하다. 따라서 전산유체역학적인 방법이 요구되고 있지만 매우 짧은 시간 내에 급격하게 변하는 온도 및 유동장, 화학적인 변화, 전자기장 통합 등을 계산하는 것은 매우 어려운 일이다.

본 프로그램은 이런 차단부의 해석을 위해 앞서 기술한 모든 계산 항목이 첨부되었으며 증명을 통해서 신뢰성을 검증하였다.

차단부의 PTFE 노즐은 아크에 의해 발생된 고온의 가스에 노출이 되고 또한 아크 복사에너지에 의해 용삭이 발생하게 된다. 이러한 과정이 반복되면서 PTFE 노즐 형상이 변형이 되며, 차단부의 성능에 영향을 미친다. 용삭에 의해 발생된 PTFE-SF<sub>6</sub> 가스는 열챔버 내의 압력상승에 긍정적인 영향을 미치지만 이후 형상이 변하면서 악영향을 동시에 주게 된다. 이런 영향들을 수치해석을 통해 차단부 내부에 어떤 유동 패턴이 일어나는지 관찰할 수 있었다.

본 수치해석 기법을 이용하여 용삭의 영향 및 차단성능을 미리 예측할 수 있는 모듈만 개발된다면 초기 설계 모델에 대한 차단성능뿐만 아니라 용삭에 의한 형상변경 후의 차단성능을 미리 파악하여 차단부의 노즐 교체 수명을 알 수 있으므로 최근 큰 이슈가 되고 있는 전력계통 보호뿐만 아니라 자체 유지보수 비용을 절감할 수 있을 것으로 생각된다.

### 후 기

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

### 참고문헌

- [1] 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.
- [2] L. S. Frost and R. W. Liebermann, 1971, "Composition and transport properties of SF<sub>6</sub> and their use in a simplified enthalpy flow arc model", *Proc. IEEE*, Vol.59, pp.474-485.
- [3] 김진범, 권기영, 이학성, 2007, “초고압 복합소호 차단부의 열가스 거동 예측”, 2007년 대한기계학회 춘계학술대회 논문집