

# 열파퍼식 가스차단기에서 발생하는 아크 플라즈마에 의한 열유동 특성

論 文
54B-11-4

## Thermal Flow Characteristics Driven by Arc Plasmas in a Thermal Puffer Type GCB

李 鍾 哲\* · 金 允 濟†  
(Jong-Chul Lee · Youn J. Kim)

**Abstract** - During the last ten years the new interruption techniques, which use the arc energy itself to increase the pressure inside a chamber by the PTFE nozzle ablation, have displaced the puffer circuit breakers due to reduced driving forces and better maintainability. In this paper, we have investigated the thermal flow characteristics inside a thermal puffer type gas circuit breaker by solving the Navier-Stokes equations coupled with Maxwell's equations for considering all instabilities effects such as turbulence and Lorentz forces by transient arc plasmas. These relative inexpensive computer simulations might help the engineer research and design the new interrupter in order to downscale and uprating the GIS integral.

**Key Words** : Gas Circuit Breaker(GCB), Arc Plasma, PTFE(Polytetrafluoroethylene), Thermal Puffer Type, Ablation, Lorentz Force, Ohmic Heating

### 1. 서 론

산업용 기기분야의 전원용 전기기기로 분류되어 있는 전력용 개폐장치 중 하나인 가스차단기(Gas Circuit Breaker, GCB)는 1970년대 이후의 지속적인 투자와 연구개발의 결과로 세계시장에서 상당한 경쟁력을 확보하고 있는 제품 중 하나지만, 도시의 과밀화와 디지털화로 인하여 전력공급의 신뢰도 향상과 도시 미관 개선 및 친환경적인 설비에 대한 요구의 증가로 지속적인 연구개발, 투자, 기술혁신을 요구하고 있다. 하지만 산업적인 특성상 기술 및 노동집약적인 산업으로 기술축적 기간이 길며, 대용량·초고압 제품일수록 대단위 설비투자 및 고도기술을 필요로 한다. 또한 투자회수 기간이 길고, 생산의 탄력성이 취약하며, 산업연관 효과가 크기 때문에 급변하는 세계시장에서의 경쟁력 유지 및 신사업 영역 확보에 많은 어려움이 따른다[1]. ABB, SIEMENS, AREVA 등 해외 선진업체에서는 높은 수준의 기술력을 바탕으로 상당한 수준의 콤팩트화·저조작력화를 달성한 것으로 판단되며, 이와 같은 가스절연 개폐장치(Gas Insulated Switchgear, GIS) 전체의 콤팩트화·저조작력화를 실현하기 위해서는 GIS의 핵심부품인 가스차단부의 획기적인 기술발전이 선행되어야 하고, 이러한 기술발전은 각종 차단방식, 조작방식의 개발에 의한 것은 물론 근래의 눈부신 해석기술의 진보에 의한 점이 크다[2].

차단설계에는 아크 발생에 의한 챔버 내부의 열·유체역학적인 특성 파악이 핵심인데, 열유체-전자기 현상이 결합

된 물리적 현상이기 때문에 해석기법의 개발이 다른 설계부문에 비하여 미약하다. 따라서 아직 선진국에서도조차 신뢰성 있는 방법을 확립하지 못한 단계이며, 국가적으로 기술 유출을 금지하는 중요한 사항이기 때문에 핵심 기술의 국외 의존도가 높은 국내의 연구 여건상 활동이 활발하지 못한 실정이다. 하지만 현재 갖추어져 있는 국내의 생산설비와 가공, 조립, 성능평가 등의 기술수준을 고려할 때, 해외시장에서의 경쟁력을 갖추고 당당히 겨루기 위해서는 열유동-전자기장 복합해석을 통해 가능한 차단설계 기술과 같은 기초 핵심 기술에 대한 지속적인 연구가 절실히 요구된다.

본 연구에서는 영국 Liverpool University 전기공학부 연구그룹과의 SF6 아크 플라즈마 모델링에 관한 공동연구 경험[3-5]을 토대로 현재 차단방식의 주류를 이루고 있는 열파퍼 방식(그림 1)의 초고압 GCB의 대전류 차단시 발생하는 아크 및 열유동현상을 해석하여, 주어진 형상의 차단부에 대하여 값비싼 단락시험에 의하지 않고도 취약한 부분을 찾아내고 수정함으로써 설계 및 제작상의 효율을 높일 수 있는 해석기술을 개발하고자 한다. 이를 위해서는 대전류 영역 및 전류영점 부근의 아크 플라즈마를 원활히 수치계산하기 위한 지배방정식, 아크의 복사에너지 모델링, 아크와 주변 가스의 난류효과에 효과적인 난류모델, 그리고 로렌츠(Lorentz)힘 및 주울(Joule)열을 계산하기 위한 전자계 해석기법을 확립해야 할 것이다. 또한 이 분야에서 세계적으로 주요 과제로 대두될 아크열에 의한 주변 부품(PTFE 노즐, Cu-W 접점)의 용삭(Ablation)·용손(Evaporation) 현상 및 질량전달(Mass transfer) 프로세스의 모델링 기법을 확립해야 한다. 본 논문에서는 이러한 일련의 과정 중 첫 번째로 대전류 영역에서의 차단현상을 해석적인 방법으로 정보를 얻을 수 있는 모델링 기법을 확립하기 위해 상용 CFD코드인 PHOENICS를 이용하였다.

† 교신저자, 正 會 員 : 성균관대학교 기계공학부 정교수

E-mail : yjkim@skku.edu

\* 正 會 員 : 성균관대학교 기계공학부 연구교수

接受日字 : 2005年 8月 3日

最終完了 : 2005年 9月 26日

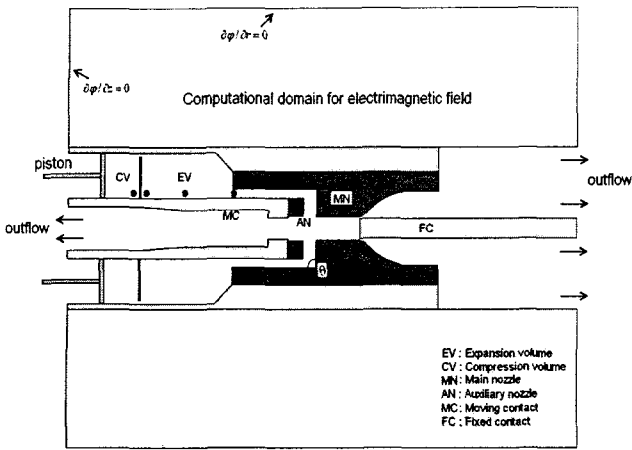


그림 1 열파퍼 차단부의 개략도 및 해석영역  
Fig. 1 Schematic diagram of thermal puffer type GCB for computation

## 2. 본 론

### 2-1 아크 모델링

가스차단기에서 발생하는 아크 플라즈마에 의한 열유동 특성을 해석하기 위해 요구되는 미분형 방정식은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 열유동장을 위한 Navier-Stokes 방정식이며, 다른 하나는 전자기장을 위한 Maxwell 방정식이다. 아크 플라즈마를 해석하기 위해서는 이 두 운동장을 결합(Coupling)해야 하며, 이를 위한 보존형 지배방정식은 다음과 같다.

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

표 1에 열유동장 및 전자기장 해석을 위한 변수( $\phi$ )에 따른 확산계수( $\Gamma_\phi$ )와 생성항( $S_\phi$ )을 나타내었으며, 자세한 기호 설명은 참고문헌[4-8]을 참고하기 바란다.

본 연구에서는 접점 사이에서 발생하는 아크에너지(에너지 방정식의  $\alpha E^2$ 항)를 계산하기 위하여 전위분포(Electrostatic potential)를 계산하는 방법을 사용하였다. 극간의 전위분포( $\phi$ )를 구함으로써 전류밀도  $J$ 와 아크저항  $R$ 로부터 전계분포( $E$ )를 구하며, 최종적으로는 주울열( $\alpha E^2$ )을 계산할 수 있다. 발생한 아크에너지에 관련된 복사현상(에너지방정식의  $q$ 항)을 모델링하기 위하여 자기흡수를 고려할 수 있는 실린더 모델을 사용하였다. 이에 필요한 순방출계수(Net emission coefficient)는 Liebermann & Lowke[9]에 의해 제시된 값을 사용하였다. 발생한 전계와 자계에 의한 로렌츠 힘을 고려하여, 접점 사이에서 발생한 아크에 자기펌핑(Magnetic pumping)효과를 나타낼 수 있도록 전류밀도  $J$ 와 아크전류에 의한 원주방향 자계  $B$ 를 구하였다.

$$B = \frac{\mu_0 \int_0^l J 2\pi r dr}{2\pi r} \quad (2)$$

표 1 지배방정식에 필요한 변수에 따른 확산계수와 생성항

Table 1 Definitions of  $\phi$ ,  $\Gamma_\phi$  and  $S_\phi$  for governing equations

Equations	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
Continuity	1	0	0
Axial momentum	w	$\mu + \mu_t$	$\partial p / \partial z + (J \times B)_z + \text{viscous terms}$
Radial momentum	v	$\mu + \mu_t$	$\partial p / \partial r + (J \times B)_r + \text{viscous terms}$
Enthalpy	h	$k + k_t / c_p$	$dp / dt + \alpha E^2 - q + \text{viscous dissipation}$
Turbulent kinetic	k	$(\mu + \mu_t) / \sigma_k$	$\rho(P_k - \epsilon)$
Turbulent dissipation	$\epsilon$	$(\mu + \mu_t) / \sigma_\epsilon$	$\rho \epsilon / k (C_{1\epsilon} P_k - C_{2\epsilon} \epsilon)$
Electrostatic potential	$\phi$	$\sigma$	0
PTFE concentration	$c_m$	$\rho(D_1 + D_t)$	0

고온고압의 아크 플라즈마의 특성을 나타내는 열적 및 이송적 성질(Thermodynamics and transport properties)은 Frost & Liebermann[10]이 제안한 순수 SF<sub>6</sub> 가스 데이터를 기준으로 SF<sub>6</sub>-PTFE 혼합가스에 관한 Zhang 등[11]이 제안한 계산결과를 사용하였다. 또한 아크에 의한 난류특성을 모델링하기 위하여 Fang 등이 제안한 수정된 프란틀 혼합거리 모델[12]과 표준 k- $\epsilon$ 모델을 사용하여 비교하였다.

### 2-2 PTFE노즐 용삭 모델링

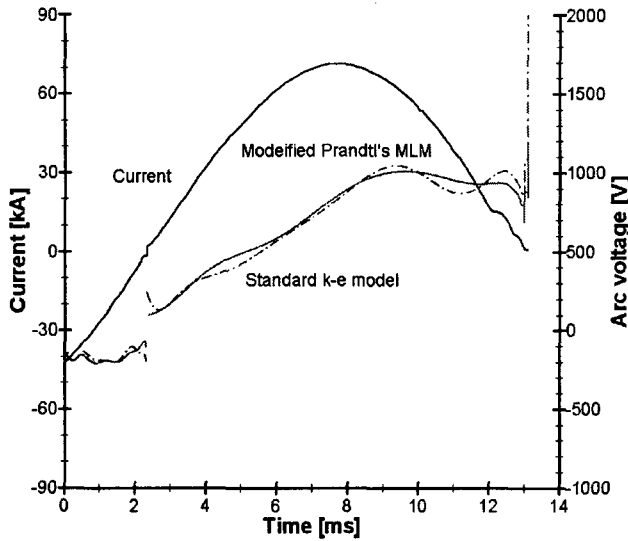
파퍼 실린더의 기계적인 조작력을 저감하기 위하여 제안된 새로운 소호방식들은 아크에너지에 의하여 증발되는 강화테프론(Polytetrafluoroethylene, PTFE)노즐의 용삭현상을 압력상승에 이용하여 상대적으로 작은 조작에너지로 더 큰 파퍼 실린더 압력상승을 유도하고 있다. 따라서 용삭가스에 의한 파퍼 실린더 압력상승과 아크의 냉각을 수치계산하기 위한 모델링이 추가적으로 검토되어야 한다. 노즐재료인 PTFE는 600K에서 증발하며 그 사이에 증발에너지( $5.73 \times 10^4$  [J/kg])를 아크로부터 빼앗는다. 또한 발생한 PTFE 용삭가스는 가스 흐름 속으로 유입되는데 3,400K에서 해리가 일어나고, 해리 에너지를 아크로부터 빼앗는다. Ruchi & Niemeyer[13]의 실험적 연구에 의하면 방출되는 PTFE 용삭가스의 온도는  $3400K \pm 200K$ 라 보고되고 있다. 방출된 용삭가스는 주변의 SF<sub>6</sub>가스와 대류와 확산에 의하여 혼합되게 되므로 이를 위한 질량농도방정식이 필요하다(표1 참고). 그리고 노즐로부터 방출되는 용삭가스의 양은 다음 식으로부터 구할 수 있다[10].

$$\dot{m} = (FQ) / h_a \quad (3)$$

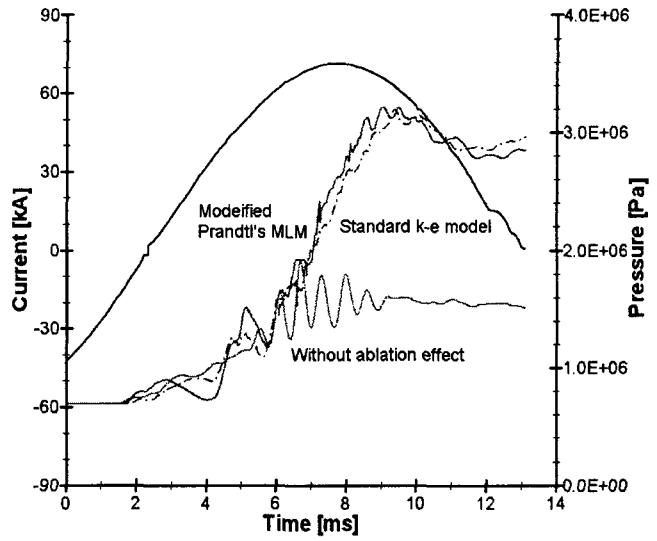
여기서  $Q$ '는 노즐 표면에 도달하는 총복사량,  $\dot{m}$ 은 용삭량, 해리 에너지  $h_a$ 는 PTFE 분자의 결합을 깨고 단위질량의 3,400K 온도를 가진 PTFE 용삭가스를 만드는데 소모되는 총에너지로 약  $1.19 \times 10^7$  [J/kg]이다. 또한  $F$ 는 실험상수로서 본 연구에서는 0.9를 사용하였다.

### 3. 결 과

#### 3-1 팽창실 내부의 압력변화



(a) 아크전압  
(a) Arc voltage



(b) 팽창실 압력상승  
(b) Pressure-rise inside the EV

그림 2 차단과정에서 계산된 아크전압과 팽창실

Fig. 2 Calculated arc voltage and pressure-rise inside the expansion chamber during whole switching process

혀 있는 상태로 대전류 구간 및 전류영점 구간이 진행된다. 따라서 본 연구에서는 해석의 편의를 위하여 압축실의 피스톤 운동을 고려하지 않았으며, FC의 이동속도 또한 8m/s로 일정하다고 가정하였다. 그리고 Chervy 등[14]은 순수 SF<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>의 순방출계수가 혼합가스인 SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>-C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>와 거의 유사함을 발표하였고, 대전류 구간에서는 아크의 온도가 18,000K 이상이기 때문에 본 연구에서는 SF<sub>6</sub>-PTFE 혼합가스의 순방출계수가 순수 SF<sub>6</sub>와 같다고 가정하였다.

해석모델의 아크시간(Arcing time)은 13.1 [ms]이며, 투입 전류는 최대 50kA<sub>rms</sub>이다. 전체 계산구간에서의 아크전류에 대한 아크전압과 팽창실 압력상승의 해석결과를 그림 2(a), (b)에 각각 표시하였다. 대전류 구간동안 아크전압의 크기는 평균 800V를 나타내고 있으며, 전류영점 부근(100A)에서는 아크냉각에 의해 급상하는 현상을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 팽창실의 압력상승은 점점 사이에 발생한 아크 플라즈마의 소호특성을 좌우하는 가장 큰 변수로서 열과퍼식 차단부에서는 PTFE 용삭가스의 팽창실로의 역류로 인한 열 및 물질전달에 의하여 FC가 MN(Main nozzle)부를 모두 빠져나올 때까지 일어나게 된다. 그림 2(b)에 용삭현상을 고려하지 않고 계산한 경우를 보면, 전류영점 직전의 압력상승은 용삭현상을 고려한 경우에 비교하여 30~40% 정도 밖에 되지 않는 것을 확인할 수 있으며, 팽창실로 유입되는 용삭가스에 의한 압력상승이 매우 중요한 것을 알 수 있다. 노즐 폐색 현상 등에 의하여 최대전류값 이후에도 계속 압력상승이 일어나는 것을 잘 예측하고 있으며, 이후의 압력감소는 점점 사이의 아크 플라즈마를 냉각시키는 소호력을 발휘하는데 사용된다.

열과퍼식 소호부에서 팽창실과 압축실은 가변밸브로 연결

되어 있으며, 소전류 차단구간을 제외하고는 가변밸브가 단 적용된 난류모델(프란틀 혼합거리 모델과 표준 k-ε 모델)에 따라 아크전압과 압력상승의 계산치가 약간씩 차이가 나는

데, 차단현상에 적용되는 난류모델은 대전류 구간에서는 물론 전류영점 부근에서 아크영역의 냉각현상 예측에 중요한 역할을 하기 때문에 체계적인 연구가 필요한 주제이다. 아크전압은 점점 사이에서 발생한 아크 플라즈마의 특성을 나타내는 지표로 사용될 수 있고, 팽창실 압력상승은 아크 플라즈마로부터 발생한 에너지의 유입 및 유출 특성을 파악할 수 있는 척도로 이용될 수 있다. 첫 번째 전류영점 부근과 최대전류치 이후 전류감소가 급격한 30kA 이후에는 이전까지 축적된 압력에너지를 팽창실로부터 점점 사이로의 유동을 발생시키고, 점점 사이의 아크 플라즈마를 냉각시키는 구간이기 때문에 적용된 난류모델에 따른 아크전압의 차이가 발생하게 됨을 알 수 있다. 열과퍼식 가스차단기에서 발생하는 아크 플라즈마에 적합한 난류모델에 관한 연구는 아직까지 진행된 바가 없으며, 이에 대한 검토 및 실험데이터와의 비교를 통한 최적의 난류모델의 개발은 추후 지속적인 연구를 통해서 발표하기로 한다.

#### 3-2 아크온도 및 PTFE 용삭가스 농도변화

실제 측정시험과 비교하여 해석적 연구의 장점 중 하나는 순간적으로 발생하는 아크 플라즈마 현상을 가시화하여 세밀히 검토할 수 있으므로 물리적 현상에 관한 이해를 돕고, 실제 제품성능에 미치는 요인들의 면밀한 파악이 가능하다는 것이다. 그림 3(a)~(f)에 차단과정에서 발생하는 아크온도, PTFE 용삭가스 농도, 그리고 유선의 변화를 차단과정의 전류변화에 따라 나타내었다. 그림의 상부는 PTFE농도(0~1)와 유선을 함께 나타낸 것이며, 하부는 가스온도(0~25kK)를 표시하고 있다.

그림 3(a)는 FC가 AN부를 빠져나오는 시점으로 접점 사이의 아크에너지 및 AN부에서 발생한 용삭가스가 팽창실로 유입되는 것을 알 수 있으며, 그림 3(b)는 첫 번째 전류영점을 지나는 시점으로 아크에너지로의 입력이 상대적으로 작기 때문에 팽창실로의 유입이 활발하지 않음을 볼 수 있다.

삭가스가 MN부에서 발생하여 팽창실 및 좌측 유출구 방향으로 유동이 전개됨을 관찰할 수 있다. 노즐부에서 팽창실을 연결되는 유로의 형상에 따라 와류동(Vortex flow)와 유동손실의 크기가 좌우되므로 이에 관한 최적화 설계가 추가적으로 검토되어야 한다. 그림 3(e)는 FC가 MN부를 모두

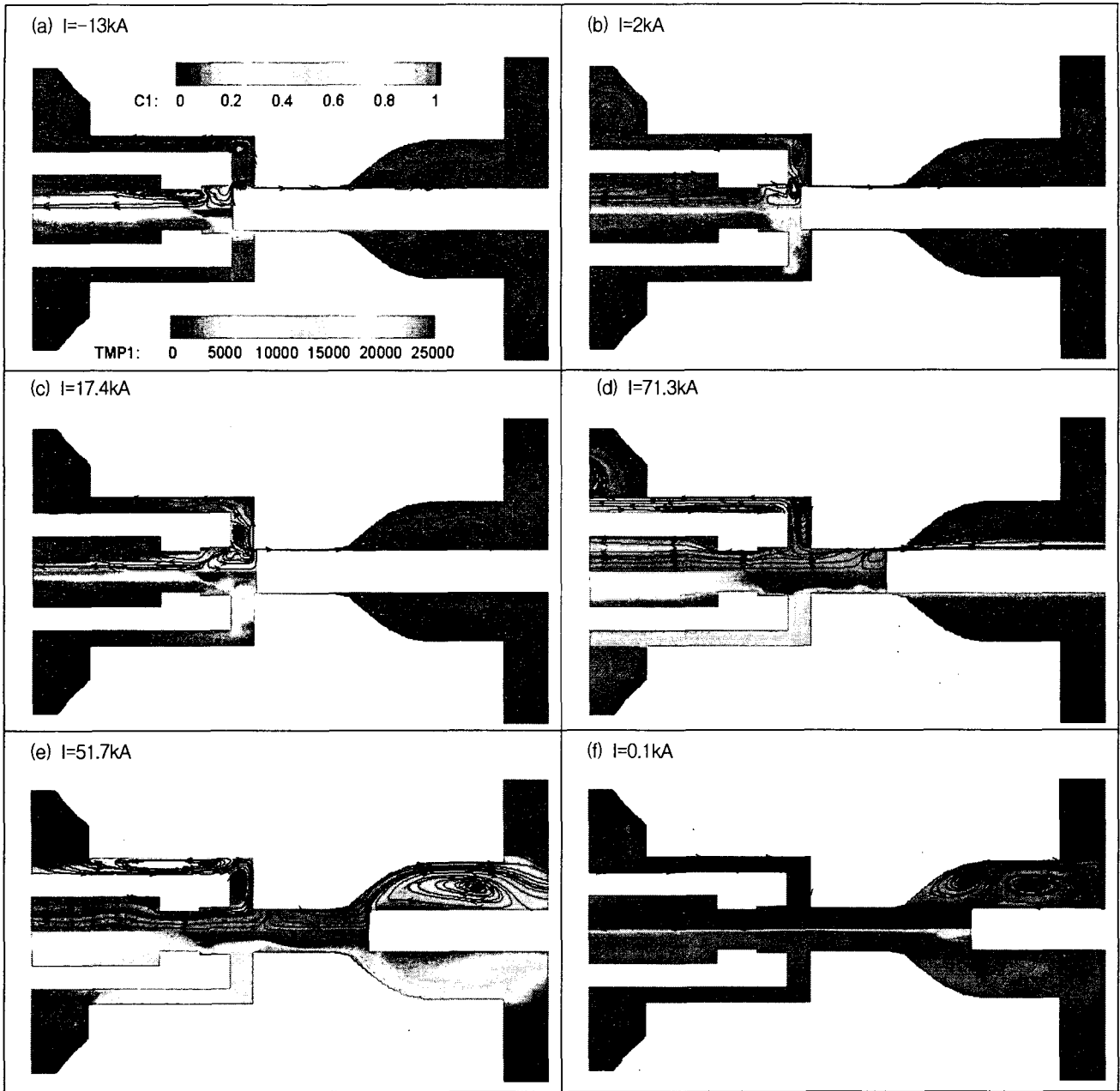


그림 3 차단과정에서 계산된 PTFE농도 및 유선(상부) 그리고 가스온도(하부) 변화  
 Fig. 3 PTFE concentration with streamline (upper) and temperature distribution (lower) between the electrodes

또한 그림 3(c)는 FC가 MN부로 들어서는 시점으로 입력전류가 커지기 시작하면서 AN부의 용삭가스 유출이 다시 활발해지는 것을 알 수 있으며, 그림 3(d)는 FC가 MN을 통과하는 전류최고치 시점으로 노즐폐색현상으로 매우 많은 용점 방향으로의 흐름이 형성되게 된다. 마지막으로 그림 3(f)는 차단이 이루어지는 두 번째 전류영점 근방으로 방향 전환된 유동이 활발하게 접점 사이의 열가스를 냉각시키고, 유

빠져나온 시점으로 노즐폐색이 해제되어 양방향으로 유동이 형성되고 전류가 감소함에 따라 접점 사이의 압력보다 팽창실에 축적된 압력이 크게 되면 유동의 방향이 전환되어 접출구 방향으로 빠져나가게 함을 볼 수 있다. 좌측 유출구에 비하여 FC가 위치한 우측 유출구 부근에는 2차유동 및 유동박리 등의 복잡한 유동을 형성하게 되는데, 이러한 유동손실 및 저항을 최소화할 수 있는 노즐유출각 및 노즐목 길이

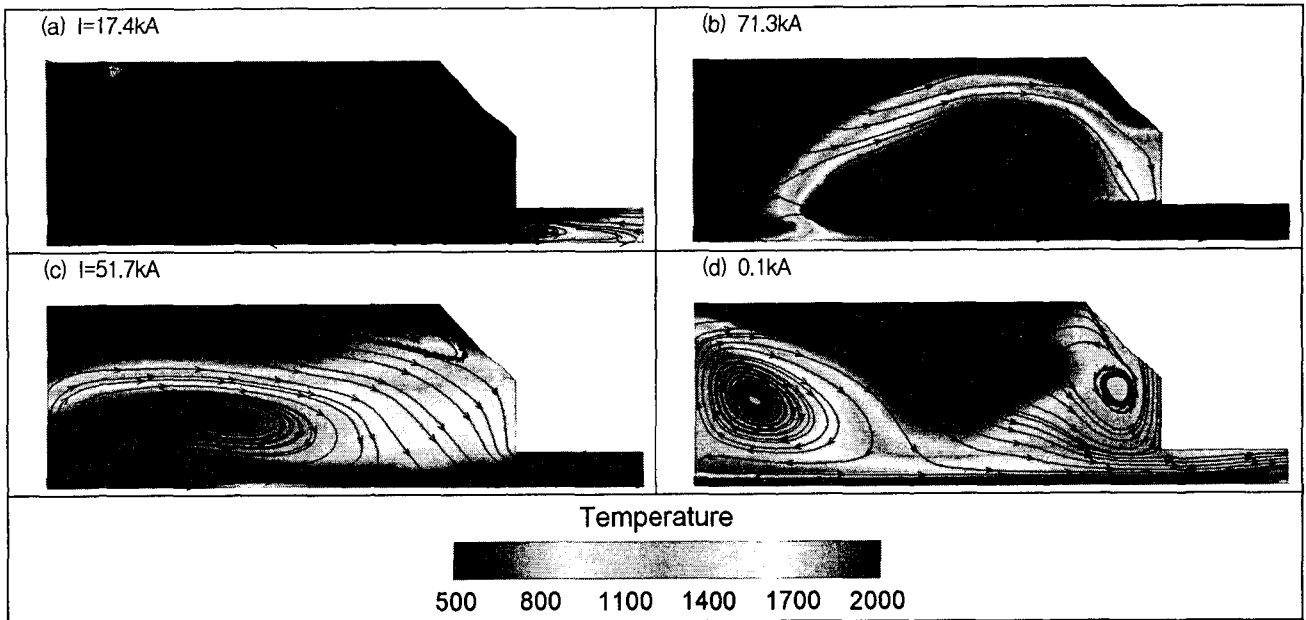


그림 4 차단과정에서 계산된 팽창실 내부의 열유동 특성 (온도분포 및 유선)

Fig. 4 Thermal flow characteristics inside the expansion chamber at specific periods (temperature distribution and streamline)

등의 형상에 관한 설계검토가 요구된다.

### 3-3 팽창실 내부의 열유동 특성

열과퍼식 가스차단부는 아크소호에 필요한 압력상승을 기계적 압축이 아닌 차단과정에서 필수불가결하게 발생하는 아크에너지 자체를 이용하는 메커니즘을 채택하고 있다. 따라서 팽창실의 형상 및 압축실과 연결된 가변밸브의 위치 등에 따라서 전류영점에서 얻을 수 있는 소호력의 차이가 극명하게 된다. 그림 4 (a)~(d)는 전술한 그림 3의 (c)~(f) 내용 중 팽창실만을 확대하여 팽창실 내부의 온도분포와 유선을 나타낸 것이다. 점점 개극 이후 점점 사이에서 발생된 아크에너지는 용삭가스와 함께 압력팽창을 유도하고 팽창실로의 유동을 일으키게 된다(그림 3(a)). 입력전류의 크기가 증가함에 따라 팽창실로 유입되는 에너지 및 PTFE농도도 커지게 되므로 팽창실의 압력은 증가하게 된다(그림 3(b)). 최대전류점을 지난 후에도 노즐폐색현상이 유지되는 동안은 계속적으로 팽창실의 압력에너지가 증가하게 되는데 팽창실의 형상에 따라 유입된 열가스와 기존의 냉가스의 혼합 정도를 좌우한다. 이를 개선하기 위하여 팽창실 내부에 유동 안내판(Flow guide) 등의 추가적인 장치를 설치하는 경우도 있다. 이후 입력전류의 크기가 감소함에 따라 점점 사이의 압력은 함께 감소하게 되는데, 팽창실의 압력이 이보다 더 커지게 되면 팽창실에서 점점 사이로의 유동방향의 역전현상이 발생하게 되어 전류영점에서의 차단을 위한 아크 플라즈마의 냉각과정에 돌입하게 된다 (그림 3(c)). 전류영점 부근에서의 소호가스의 온도가 낮을수록 차단에 유리하므로 앞서 설명한 팽창실에서 열가스와 냉가스의 혼합이 원활히 이루어질 수 있는 형상 디자인이 중요한 설계변수 중 하나라 하겠다. 본 연구에서 채택된 팽창실의 형상은 차단과정 초기에는 앞부분에 커다란 와류를 형성시키고, 차단과정 후

기에는 뒷부분에 커다란 와류를 나타나게 한다는 것을 확인할 수 있었다. 팽창실에서 발생하는 와류동은 점점 사이로의 분사력(Blowing force)을 감소시켜 점점 사이의 열가스를 냉각하는데 불리할 수 있다. 따라서 차단성능의 향상을 위해서는 팽창실에서 발생하는 와류의 크기를 줄이고 혼합을 촉진할 수 있는 아이디어의 도출 및 본 연구와 같은 해석적 방법을 통한 검증 작업이 필요하다 하겠다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 현재 초고압 차단기 시장에서 핵심기술로 분류되어 기술개발에 박차를 가하고 있는 새로운 차단방식인 열과퍼식 가스차단기의 소호특성을 고찰하기 위하여 상용 CFD 코드인 PHOENICS를 바탕으로 로렌츠힘, 주열등을 고려할 수 있도록 전자계 계산을 동시에 수행할 수 있도록 프로그래밍 하였고, 대전류 영역에서의 아크 플라즈마 유동해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 대전류 구간동안의 팽창실 압력상승은 아크에너지 뿐만 아니라 PTFE 노즐표면에서 방출되는 용삭가스의 유입이 커다란 기여를 하게 되며, 용삭을 고려하지 않은 경우에는 30~40% 정도의 압력상승만이 발생하는 것을 확인하였다.
- (2) 계산된 아크전압은 대전류 구간동안 평균 약 800V 정도였으며, 전류영점 부근에서는 아크냉각에 의한 아크전압이 급상승하는 현상을 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한 첫 번째 전류영점 부근과 최대전류치 이후 전류감소가 급격한 30kA 이후에는 점점 사이의 아크 플라즈마를 냉각시키는 구간이기 때문에 적용된 난류모델에 따라 아크전압의 차이가 발생하게 됨을 확인하였다.
- (3) 팽창실로의 가스흐름 및 점점 사이로의 열유동 특성(온

도, 농도 및 유선 등)을 고찰함으로써 열과퍼식 차단부의 소호 원리를 가시화하였으며, 팽창실과 유로 등에서 유동손실의 원인 및 정도를 확인하였다.

- (4) 팽창실에서 발생하는 와류동은 점접 사이로의 분사력을 감소시켜 점접 사이의 열가스를 냉각하는데 불리할 수 있으므로, 차단성능의 향상을 위해서는 팽창실에서 발생하는 와류의 크기를 줄이고 혼합을 촉진할 수 있는 아이디어의 도출 및 해석적 방법을 통한 검증 작업이 필요하다.
- (5) 차단현상의 해석적 방법을 통하여 현재 차단설계에서 행해지고 있는 고비용·고난이도의 단락시험의 횟수를 줄여 시간적·경제적 비용을 절감하고, 개념설계 단계에서 아크 플라즈마의 특성을 판단함으로써 새로운 설계개념을 도출할 수 있는 기반을 확보하였다.
- (6) 보다 심도있는 연구를 위해서는 시험결과와의 검증이 반드시 수반되어야 하며, 이를 통해서 최적의 난류모델, 복사모델, 그리고 용삭현상 모델링 기술개발이 요구된다.

**감사의 글**

본 연구는 과학기술부 및 과학재단 지정 성균관대학교 플라즈마응용표면기술연구센터(CAPST)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

**참고 문헌**

- [1] Garzon, R. D., "High voltage circuit breakers: Design and applications 2nd", Marcel Dekker, New York, 2002.
- [2] Schavemaker, P., "Digital testing of high-voltage SF<sub>6</sub> circuit breakers", Dissertation, Delft University of Technology, 2002.
- [3] Lee, J. C., Ahn, H. S., Oh, I. S., and Kim, Y. J., "Application of CFD-CAD integration techniques for GCB design", 14th Gas Discharge Conference, ENGLAND, pp. 276-279 (Vol. 2), 2002.
- [4] Lee, J. C. and Kim, Y. J., "Numerical modeling of SF<sub>6</sub> thermal plasma generated during the switching process", Thin Solid Films, Volume 475, Issues 1-2, pp. 72-80, March 2005.
- [5] Lee, J. C. and Kim, Y. J., "Calculation of the interruption process of a self-blast circuit breaker", IEEE Transactions on Magnetics, Volume 41, No. 5, pp. 1592-1595, May 2005.
- [6] 이종철, 안희섭, 오일성, 최중웅, "CFD-CAD 통합해석을 이용한 초고압 차단기 내부의 냉가스 유동해석 프로그램 개발", 전기학회논문지, 51B권, 5호, pp. 242-248, 2002.
- [7] 이병윤, 송기동, 정진교, 박경엽, "고온·고압 아크 플라즈마 하에서의 정상상태 노즐용삭 해석 기술", 전기학회논문지, 52C권, 9호, pp. 395-399, 2003.
- [8] 이병윤, 송기동, 정진교, 박경엽, "노즐용삭을 고려한

SF<sub>6</sub> 가스차단기 노즐의 열적회복특성 해석", 전기학회 논문지, 54C권, 2호, pp. 76-82, 2005.

- [9] Liebermann, R. W. and Lowke, J. J., "Radiation emission coefficient for sulphur hexafluoride", JQSRT, Vol. 17, pp. 253-264, 1976.
- [10] Frost, L. S. and Liebermann, R. W., "Composition and properties of SF<sub>6</sub> and their use in a simplified enthalpy flow arc model", Proceedings of the IEEE, Vol. 59, No. 4, pp. 474-485, 1971.
- [11] Zhang, J. L., Yan, J. D., Murphy, A. B., Hall, W., and Fang, M. T. C., "Computational investigation of arc behavior in an auto-expansion circuit breaker contaminated by ablated nozzle vapor," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 30, pp. 706-719, 2002.
- [12] Fang, M. T. C., Zhuang, Q., and Guo, X. J., "Current zero behavior of an SF<sub>6</sub> gas-blast arc. Part II: Turbulent flow", J. Phys. D., Appl. Phys., Vol. 17, pp. 74-83, 1994.
- [13] Ruchti, C. B. and Niemyer, L., "Ablation controlled arcs", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. PS-14, pp. 423-434, 1986.
- [14] Chervy, B., Riad, H., and Gleizes, A., "Calculation of the interruption capability of SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub> and SF<sub>6</sub>-C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> mixtures-Part I: Plasma properties," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 24, pp. 198-217, 1996.

**저 자 소 개**



**이 종 철 (李 鍾 哲)**

1971년 1월 2일생. 1994년 성균관대학교 기계공학과 졸업. 1996년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 현재 성균관대학교 기계공학부 연구교수.  
Tel : (031) 290-7485  
Fax : (031) 290-5889  
E-mail : phoe21@skku.edu



**김 윤 제 (金 允 濟)**

1960년 12월 26일생. 1982년 성균관대학교 기계공학과 졸업. 1987년 뉴욕주립대학교(Buffalo) 기계공학과 졸업(석사). 1990년 뉴욕주립대학교(Buffalo) 기계공학과 졸업(공학박사). 현재 성균관대학교 기계공학부 정교수.  
Tel : (031) 290-7448  
Fax : (031) 290-5889  
E-mail : yjkim@skku.edu