

# 연성해석을 통한 열파퍼 플라즈마 챔버의 아크현상 이력에 관한 연구

이종철<sup>†</sup>·허중식\*·김윤제\*\*

## A Study of the Arcing History in a Thermal Puffer Plasma Chamber with a Coupled Simulation

Jong Chul Lee, Joong Sik Heo and Youn Jea Kim

**Key Words:** Coupled simulation(연성해석), Thermal plasma(열플라즈마), Arcing history(아크현상 이력), Ablation(용삭), Evaporation(증발)

### Abstract

The coupled simulation is performed to find out the interaction of arc plasmas with surrounding materials in a thermal puffer plasma chamber. In order to be more realistic, PTFE nozzle ablation and Cu electrode evaporation, which are caused by high temperature of arc plasmas, are considered together. Pressure rise and temperature inside the chamber generated during the whole arcing history are investigated with the applied currents. It is very important to define how thermal flow and mass transfer are processing between the arc plasma and surrounding materials for further understanding complex physics inside the chamber. It is concluded that the result might be very useful to understand the mechanism happened inside and to design thermal puffer plasma chambers, but further experimental studies are required to verify the results for the more practical applications.

### 1. 서 론

아크 플라즈마 (또는 열플라즈마, thermal plasma) 를 포함한 유동장은 전자기장에 의해 큰 영향을 받는 대표적인 학제적 (interdisciplinary) 분야로서 원리의 이해 및 취급이 용이하지 않으나 주요 응용분야의 확장으로 점점 관심이 증대되고 있다. 주요 응용분야로는 전기정련, 용접, 절단, 에칭이나 CVD 등 반도체 제조공정, 조명, 추진, 에너지 원 등이며, 나노기술의 발전과 더불어 에어로졸 연구의 나노입자 (nanoparticle) 발생장치 등에 적용되고 있다<sup>(1)</sup>.

산업용 기기분야의 전력용 개폐장치 중 하나인 가스차단기에는 단락사고 등이 발생할 경우 신속하고 정확하게 작동하여 고장전류를 차단하는 것이 주요 기능인데, 차단과정 중 절연성능이 우수한 SF<sub>6</sub> 가스로 채워진 아크 챔버 (arc or plasma chamber)에서는 점점 분리에 의하여 고온의 아크 플라즈마가 발생하게 된다. 발생된 플라즈마는 교류과형의 전류가 흐르는 대전류 구간 (high current period)동안 유지되며, 60Hz 주파수에 의해 나타나는 전류영점 (current zero)에서는 에너지 입력이 없게 되므로 아크 플라즈마가 자연스럽게 거의 소멸된다. 하지만 전류영점 직후 에너지 차단에 의한 반작용 현상으로 커다란 크기의 회복 전압 (recovery voltage)이 전극 사이에 인가되는 것이 사고전류 차단성패에 중요한 검토 부분이다. 두 점점 사이의 절연성능은 전기전도도, 온도, 밀도 등의 영향을 받기 때문에 대전류 구간 동안 발생되었던 고온 영역들을 짧은 시간동안 충

<sup>†</sup> 회원, 강릉대학교 기계자동차공학부

E-mail : jclee01@kangnung.ac.kr

TEL : (033)760-8434 FAX : (033)760-8430

\* 회원, 한국기유화시험연구원 유체기계평가팀

\*\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

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

Equations	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
Continuity	1	0	0
z-momentum	w	$\mu_l + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + (J \times B_\theta)_z + (\mu_l + \mu_t) \nabla^2 w$
r-momentum	v	$\mu_l + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + (J \times B_\theta)_r + (\mu_l + \mu_t) \nabla^2 v - \frac{2(\mu_l + \mu_t)v}{r^2}$
Enthalpy	h	$(k_l + k_t)/c_p$	$\frac{dp}{dt} + \sigma E^2 - q + (\mu_l + \mu_t) \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$
PTFE concentration	c <sub>1</sub>	$\rho(D_l + D_t)$	0
Cu concentration	c <sub>2</sub>	$\rho(D_l + D_t)$	0

분히 냉각시켜 주어야만 인가되는 회복전압에 견디어 아크 플라즈마가 다시 발생하는 재발호 (reignition)가 일어나지 않는다.

Zhang 등<sup>(2)</sup>은 상용 CFD 프로그램인 PHOENICS를 이용하여 자동팽창 (auto-expansion) 소호부의 아크 특성을 고찰하였다. 고온의 PTFE 증기에 의해 팽창실로 유입된 에너지가 압력상승을 주도함을 설명하였고, 계산된 압력결과를 실험데이터와 비교하여 검증하였다.

Sedlacek 등<sup>(3)</sup>은 가스유동과 전자기장 계산을 통하여 자력소호 (self-blast) 차단부의 최적화에 적용하였다. 열팽창 용적의 형상을 변화시켜 양호한 온도 및 유동 패턴을 갖는 챔버를 설계하였으며, PTFE 노즐 형상을 변화시켜 계산을 수행하였다.

본 논문에서는 열과퍼 플라즈마 챔버에 주입되는 교류전류에 의한 아크현상 이력 (압력, 온도 및 농도 특성)을 파악하였다. 또한 고온의 플라즈마에 의한 주변 부품 (PTFE 노즐, 금속 전극)의 용삭 (ablation) 및 용손 (evaporation) 발생을 추가하여 해석함으로써 보다 현실에 가까운 해석적 접근이 이루어지도록 하였다.

## 2. 아크 플라즈마 모델링

### 2.1 지배방정식 및 연계 (coupling) 방법

열과퍼 챔버에서 발생하는 SF<sub>6</sub> 아크 플라즈마 및 열유동 특성을 해석하기 위해 요구되는 지배방정식은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 열유동장을 위한 Navier-Stokes 방정식이며, 다른 하나는 전자기장을 위한 Maxwell 방정식이다. 전자기력이 아크 플라즈마의 운동특성을 좌우하기

때문에 아크 플라즈마 모델링을 위해서는 두 운동장을 연계할 수 있는 방법이 요구된다. 본 연구에서는 보존형 Navier-Stokes 방정식 (식 (1))을 계산하는 도중에 식 (2)와 같은 라플라스 방정식 형태의 정전위 포텐셜 (electrostatic potential,  $\Psi$ )을 추가적으로 계산함으로써 전류밀도 ( $J$ ), 아크저항 ( $R$ ), 전계분포 ( $E$ ), 주울열 ( $\sigma E^2$ ) 등을 구하였다. 또한 이들 결과를 운동량 및 에너지 방정식의 생성항으로 결합하여 아크 플라즈마를 위한 로렌츠 힘과 주울열로 구성하였다.

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

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \psi) = 0 \quad (2)$$

Table 1에 해석을 위한 변수 ( $\phi$ )에 따른 확산계수 ( $\Gamma_\phi$ )와 생성항 ( $S_\phi$ )을 나타내었다.

두 전극 사이에 발생된 아크를 통하여 전류가 흐르게 되고 이 전류 흐름에 의하여 원주방향의 자기장이 발생된다. 암페어의 주회법칙 (Ampere's circuital law)에 의해 원주방향 자기장은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\theta) = \mu_0 j_z \quad (3)$$

여기서  $\mu_0$ 는 아크의 투자율이다 ( $= 4\pi \times 10^{-7}$  H/m). 발생된 자기장은 아크에 로렌츠힘을 작용시켜 유동에 영향을 미치게 되며, 이것은 Table 1의 운동량 방정식의 생성항으로 포함시켰다.

## 2.2 기타 아크 모델링

앞서 아크 플라즈마 유지 및 거동을 위한 주열열과 로렌츠힘을 설명하였다. 그 외에도 종합적인 해석을 위해서는 고온의 아크 플라즈마로부터 발생되는 복사에너지와 그로 인한 주변의 PTFE 노즐 용삭 및 금속 전극 용손의 영향을 고려해야 한다.

작동유체가 SF<sub>6</sub>나 N<sub>2</sub> 가스인 경우, 아크 플라즈마로부터 방출되는 복사 스펙트럼이 적외선으로부터 자외선까지 분포하고 있고, 흡수계수가 좁은 영역에서도 수백 배까지 변화되기 때문에 복사현상을 모델링하는 자체가 매우 복잡하다. 현재까지 제안된 복사모델 중 중심영역 (central region), 흡수영역 (reabsorption region), 열층 (thermal layer)의 3가지 복사 특성 영역으로 구분한 실린더형 모델인 근사복사모델 (approximate radiation model)이 상당히 만족스러운 결과를 보여주고 있으며, 여기에 사용된 순방출계수 (net emission coefficient)는 Liebermann & Lowke<sup>(4)</sup>가 제시한 값을 사용하였다. 본 연구에서도 순방출계수를 이용한 근사복사모델을 적용하였다.

아크발생 영역은 절연성능이 우수한 PTFE 노즐로 둘러 싸여 있으므로 아크발생 기간 동안 복사에너지에 의해 노즐이 용삭되고, 노즐 표면에서 용삭이 발생되면 증발된 PTFE 가스는 대류와 확산에 의하여 SF<sub>6</sub> 가스와 혼합된다. 본 연구에서는 PTFE 분자결합을 깨고, 단위질량의 3,400K 온도를 가진 PTFE 용삭가스를 만드는데 소모되는 총에너지를 1.19×10<sup>4</sup> kJ/kg이라 가정하였으며, 이에 사용되는 용삭량 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{m}_1 = FQ'/h_a \quad (4)$$

여기서 Q'은 노즐 표면에 도달하는 총복사량이며, F는 경험 상수로 0.9를 사용하였다.

금속 전극 또한 고온의 아크에너지에 의하여 용손되는데 PTFE 노즐의 용삭현상과는 다르게 고체 전극으로의 에너지 수송은 열전도에 좌우되며, 주열열에 의한 음극 영역 (cathode region)의 온도상승은 아크 루트 (arc root)에 인접한 매우 작은 영역들 (음극점, cathode spots)에서 발생한다. 본 연구에서는 불규칙한 음극점들의 집중효과를 단순화하기 위하여 음극 선단 표면의 원형영역을 설정하여 아크전류가 이곳에 집중하는 것으로 가정하였다. 구리 전극이 용융점 (1,356K)에

도달하면 증기발생이 시작되며 증발량 관계식은 다음과 같다<sup>(5)</sup>.

$$\dot{m}_2 = q_v/h_v \quad (5)$$

여기서 h<sub>v</sub>는 전극 표면을 용융점까지 가열하고 (135 kJ/kg), 단위질량의 음극재료 (구리)를 상변화시키는데 (5,070 kJ/kg) 요구되는 총에너지이며, q<sub>v</sub>는 금속증발에 사용되는 에너지량이다.

작동유체인 SF<sub>6</sub>, PTFE 증기, 구리 증기 등이 혼합된 가스상태에서 확산은 두 증기의 재분포에 매우 중요한 메커니즘이다. Murphy 등<sup>(6)</sup>은 국소 열적·화학적 평형상태 하에서 혼합 확산계수는 두 기체의 혼합물 속에서 한 기체에 내포하는 종 (species)의 확산 정도를 기술하는데 사용될 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 식 (6)을 이용하여 확산계수를 직접 부여하지 않고 Schmidt 수를 지정하여 계산하였으며, 층류와 난류 확산계수로 각각 1의 값을 사용하였다.

$$D_l = \frac{\mu_l}{\rho Sc_l}, D_t = \frac{\mu_t}{\rho Sc_t} \quad (6)$$

아크 플라즈마 영역에서의 난류 모델링 또한 매우 어려운 문제 중 하나이다. Yan 등은 Prandtl의 혼합거리모델을 수정하여 SF<sub>6</sub> 노즐 아크 유동에 성공적으로 적용하였다<sup>(2)</sup>. 본 연구에서는 난류점성 (turbulent viscosity)을 구하기 위하여 아크영역을 5,000K 이상으로 가정하였고, 식 (7)을 이용하여 계산하였다.

$$\mu_t = \rho(c_1\delta) \left[ 2 \left( \frac{v}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (7)$$

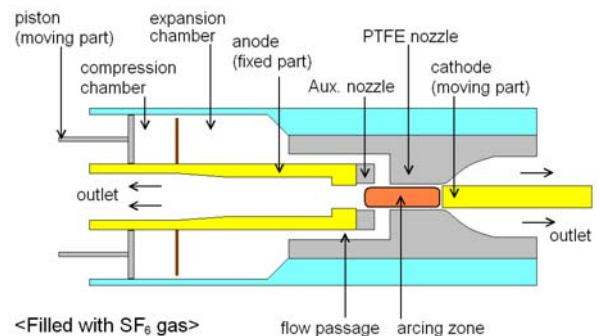


Fig. 1 Schematic of a thermal puffer plasma chamber

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 대전류 구간의 압력 특성

본 연구에 사용된 열과퍼 챔버와 팽창실에 설치된 유동 가이드의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 한 쌍의 구리 금속전극 (이동전극과 고정전극), PTFE 노즐, 피스톤으로 구성되어 있으며, 압축력을 얻기 위한 챔버는 격벽에 의하여 압축실 (compression chamber, CC)과 팽창실 (expansion chamber, EC)로 구분된다.

Figure 2에 전체 아크발생 구간에서 나타나는 팽창실 압력상승을 나타내었다. 좌측 y축의 전류비 (current ration)는 최대 전류치 71.3 kA (=50 kA<sub>rms</sub>)로 나눈 값을 의미하며, 우측 y축의 압력비 (pressure ratio)는 유동 가이드를 고려하지 않은 경우 발생한 팽창실 최대 압력상승치로 나눈 값으로 표시한 것이다. 또한 전류비 곡선에 표시된 6개의 점들은 결과비교를 위하여 지정한 것으로, 각각 초기단계인 시점 "a" (t=2.12 ms, I=4.8 kA), "b" (t=3.12 ms, I=15.1 kA), "c" (t=5.62 ms, I=57.0 kA), 최대전류치를 나타내는 시점 "d" (t=7.72 ms, I=71.3 kA), 전류 최대치를 지나 에너지 입력이 하향곡선에 접어선 시점 "e" (t=10.9 ms, I=39.7 kA), 전류영점 직전의 시점 "f" (t=13.1 ms, I=0.1 kA)를 나타낸다. 아크발생 영역에서 발생한 고온 용삭가스는 유동채널 (flow channel)을 통해 EC로 유입된다. EC로의 유입은 최대전류치를 지난 후에도 어느 정도 지속되며, 유입된 고온 가스는 기존에 존재하는 저온 작동가스를 압축하게 되므로 팽창실의 압력은 상

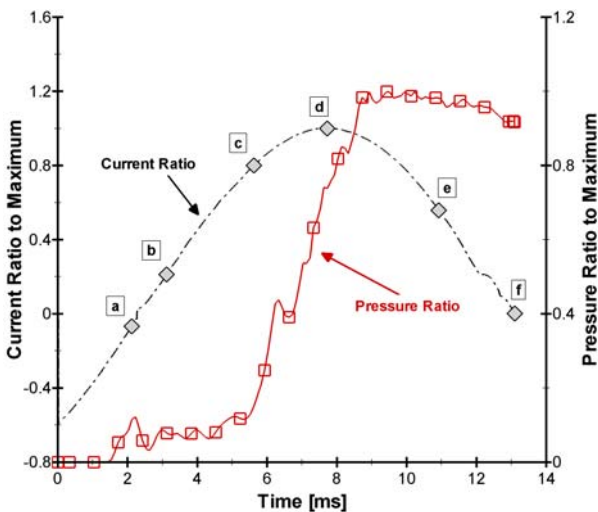


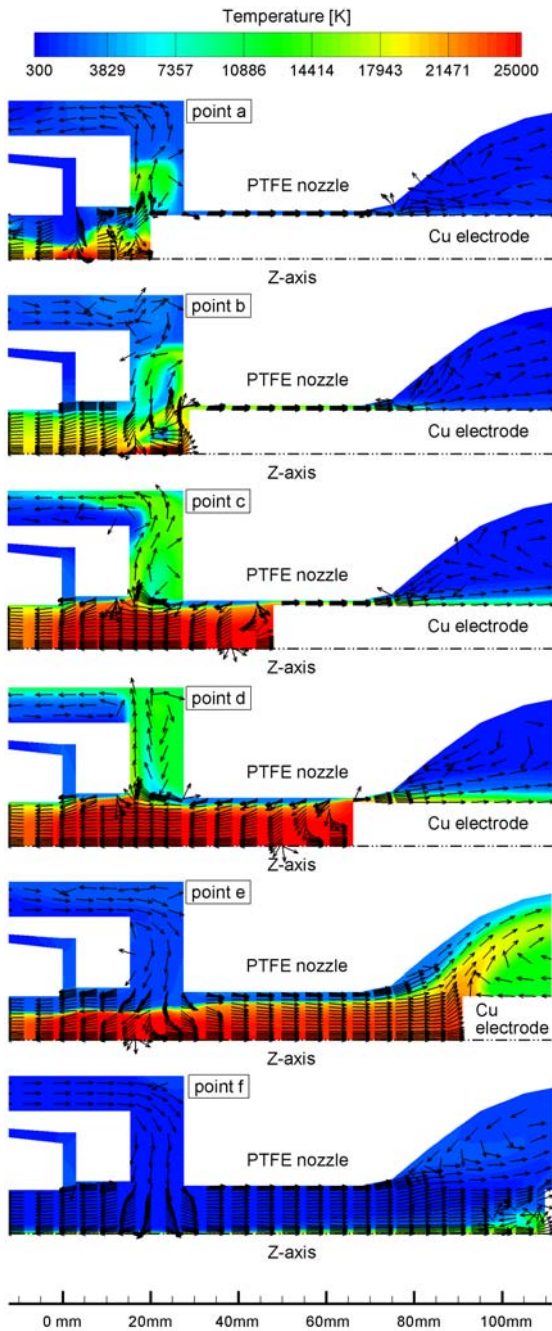
Fig. 2 Comparison of the pressure-rise inside EC for the whole arcing history

승하게 된다. 팽창실의 압력상승은 전류영점 부근에서 팽창실로부터 아크발생 영역으로의 아크 냉각을 위한 흐름을 발생시키는데 사용된다.

#### 3.2 아크 플라즈마 및 열유동 특성

전술한 바와 같이 두 전극이 분리됨에 의해 두 전극 사이에는 지속되려는 전류에너지 흐름에 의한 아크 플라즈마가 발생되며, 이동접점이 완전히 이동을 끝마칠 때까지 아크 발생 영역은 확대된다. 차단과정에서 발생하는 아크 플라즈마에 의한 온도 분포 및 유동양상을 Fig. 3에 나타내었다. 검토에 사용된 시점 "a"에서 "f"의 시간과 전류크기는 Fig. 2를 참고하기 바란다.

점점 이동의 초기 단계인 시점 "a" (t=2.12ms, I=4.8kA)에서는 음극 (이동전극)이 PTFE 노즐을 폐쇄한 상태이므로 양극 (고정전극)과 음극 사이에서 발생한 아크 에너지의 대부분은 좌측의 유동 출구로 빠져 나가며, 일부는 상부 유로를 따라 팽창실로 유입되는 것을 볼 수 있다. 시점 "b" (t=3.12ms, I=15.1kA)는 첫 번째 전류영점을 통과한 직후이기 때문에 시점 "a"와는 다르게 상부 유로를 따라 팽창실에서 아크 영역으로의 반대 흐름을 나타내고 있다. 전류영점 부근에서는 아크 영역의 에너지 크기보다 팽창실의 축적된 에너지가 크기 때문에 발생하는 양상으로, 에너지 보존의 측면에서 타당성 있는 결과라 할 수 있다. 시점 "c" (t=5.62ms, I=57.0kA)는 전류가 상승하는 부분으로서 아크 영역에 공급된 큰 에너지가 좌측 유출구 및 상부 유로로의 활발한 흐름을 발생시키고 있음을 확인할 수 있다. 시점 "d" (t=7.72ms, I=71.3kA)에서는 최대전류값이 입력되기 때문에 더욱 활발한 상부 유로를 통한 팽창실로의 에너지 유입을 나타내고 있다. 시점 "e" (t=10.9ms, I=39.7kA)는 전류 최대치를 지나 에너지 입력이 하향곡선에 접어선 시점이며, 이동전극이 PTFE 노즐목을 빠져 나온 상태이므로 좌우 유출구로의 유출량이 증가한다. 따라서 그 동안 축적된 팽창실의 압력에너지가 아크 영역보다 크기 때문에 이전과는 다르게 팽창실에서 아크 영역으로의 흐름이 나타남을 확인할 수 있다. 이는 PASB 챔버의 전형적인 특성을 나타내는 것이며, 상부 유로의 흐름방향 전환 시점은 챔버 설계에 매우 중요한 요소가 된다. 시점 "f" (t=13.1ms, I=0.1kA)은 전류영점 직전으로 이전의 대전류 구간 동안 축적된 팽창실의 압력에너지에 의하여 아크



**Fig. 3** Evolution of the arc column in terms of temperature and flow pattern for five instants (points a~f)

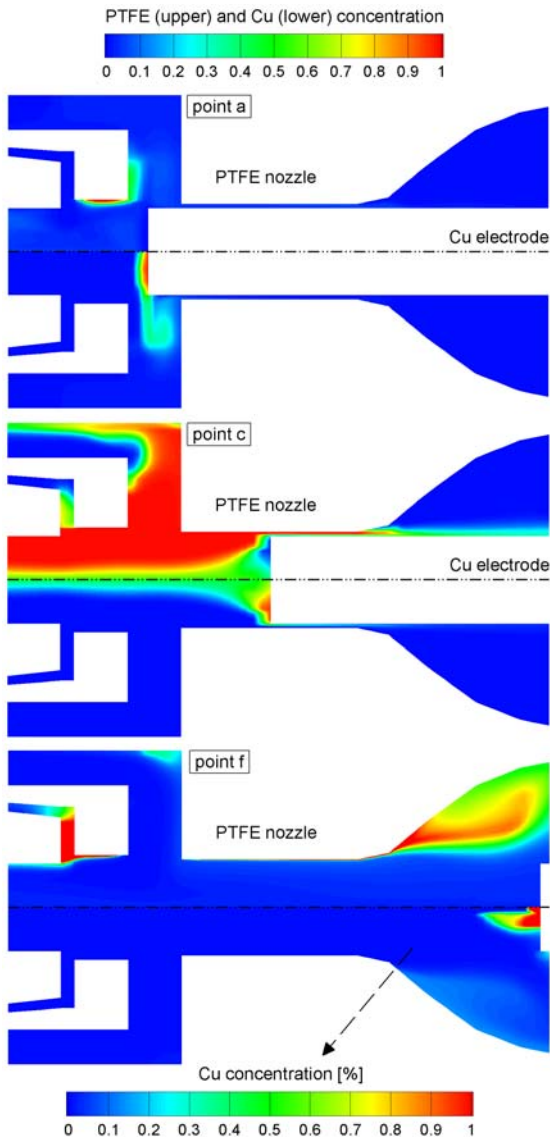
영역으로의 흐름을 발생시켜 두 접점 사이에 발생되었던 고온의 플라즈마를 냉각시키고 작동가스의 절연능력을 원활히 회복시키는 역할을 수행하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 PASB 챔버에서의 아크 플라즈마 및 유동 특성의 시간적 변화를 분석함으로써 두 접점 사이에 발생된 아크 플라즈마의 물리적 원리를 이해하고, 챔버의 최적 설계에 유용

하게 사용할 수 있다.

### 3.3 용삭 및 용손 가스의 확산 특성

아크 발생 영역은 절연능력이 우수한 PTFE 노즐로 둘러싸여 있으므로 아크 발생 기간 동안 복사 에너지에 의해 노즐이 용삭되고, 노즐 표면에서 용삭이 발생되면 증발된 PTFE 가스는 대류와 확산에 의해 SF<sub>6</sub> 가스와 혼합된다. 금속 전극 또한 고온의 아크에너지에 의하여 용손되는데, PTFE 노즐의 용삭현상과는 다르게 고체 전극으로의 에너지 수송은 열전도에 좌우되며 주울열에 의한 음극 영역의 온도상승은 음극점에서 발생한다. 구리전극에서 발생된 금속증기는 높은 전기전도도를 갖기 때문에 전류영점 후 가해지는 커다란 절연부하에 견디기 위해서는 원활한 가스흐름이 두 접점 사이의 전기전도도를 충분히 낮게 유지할 수 있는 조건을 만들어 주어야 한다.

Figure 4는 시점 "a", "c", "f"에서의 PTFE 용삭가스와 Cu 용손가스의 농도를 나타내고 있다. 축을 중심으로 상부에 PTFE, 하부에 Cu의 가스농도를 표현한다. 접점 이동의 초기 단계인 시점 "a"에서는 접점 사이에 발생된 아크 플라즈마에 의하여 보조 PTFE 노즐에서 용삭가스가 발생되며, 금속전극에서 용손가스가 발생되고 있다. 발생된 증기들은 Fig. 3에서 설명한 상부 유로를 향하는 유동 흐름과 함께 유로를 통해 팽창실로 유입됨을 확인할 수 있다. 전류가 상승하는 시점인 "c"에서는 주 PTFE 노즐에서 많은 양의 용삭가스가 발생되고, 발생된 용삭가스는 상부 유로를 통해 팽창실로 많은 양이 유입되고 있다. 이러한 용삭가스의 팽창실 유입이 팽창실의 압력상승을 유발하며 전류영점 부근에서 아크 영역으로의 냉각 가스 흐름을 만들 수 있는 에너지로 사용된다. PTFE 노즐 표면에서의 많은 용삭가스 발생으로 금속전극에서 발생하는 용손가스는 원추형을 나타내면서 좌측 유출구로 빠져나가게 된다. 또한 금속전극 선단에서 발생하는 충돌에 의하여 용손가스의 분포가 축중심에서 약간 바깥쪽으로 이동함을 확인할 수 있다. 전류영점 직전의 시점 "f"에서는 아크에너지가 매우 작기 때문에 용삭 및 용손 현상이 거의 발생하지 않으며, 전 단계에서 발생되었던 가스들이 원활히 두 접점 사이에서 제거되었음을 확인할 수 있다. 하지만 전술한 바와 같이 금속증기는 작동가스에 비하여 전기전도도가 상당히 크기 때문에 1% 정도의 존재도 플라즈마



**Fig. 4** Evolution of concentrations in terms of PTFE (upper) and Cu (lower) for three instants (points a, c and f)

소호에 커다란 영향을 미칠 수 있다. 유동 특성의 분석과 더불어 고온의 아크 플라즈마에 의해 발생된 용삭·용손 가스의 시간적 변화의 분석 또한 열과파 플라즈마 챔버의 원리 파악 및 최적 설계에 중요한 역할을 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 열과파 플라즈마 챔버에서 발생하는 아크 플라즈마 현상을 수치적으로 해석하였고, 기존의 연구와 비교하여 고온의 플라즈마에 의한 주변 부품 (PTFE 노즐, 금속 전극)의 용삭

및 용손 현상을 추가하여 계산하였다.

아크에너지에 의해 발생된 용삭 및 용손 가스의 시간적 변화를 분석한 결과 발생된 증기들은 대전류 영역에서는 팽창실로 유입되어 압력상승을 유발하고, 전류영점 부근에서는 아크 냉각을 위한 가스 흐름을 만드는데 기여함을 알 수 있었다. 전류영점 부근에서의 두 접점 사이 금속증기 분포는 작동가스의 전기전도도와 절연능력에 커다란 영향을 미침이 자명하므로, 용삭·용손 모델링을 통하여 구한 금속전극 사이의 잔류 금속증기 농도는 열과파 플라즈마 챔버 최적설계에 주요인자로 고려해야 할 것이다.

#### 참고문헌

- (1) Oh, H., Jung, J., Parj, H., Ji, J. and Kim, S., 2006, "Generation of Silver Nanoparticles by Spark Discharge Aerosol Generator Using Air as a Carrier Gas", *Transaction of the KSME B*, Vol. 30, No. 2, pp. 170~176.
- (2) Zhang, J. L., Yan, J. D., Murphy, A. B., Hall, W. and Fang, M. T. C., 2002, "Computational Investigation of Arc Behavior in an Auto-expansion Circuit Breaker Contaminated by Ablated Nozzle Vapor", *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, Vol. 30, No. 2, pp. 706~719.
- (3) Sedlacek, J., Vostracky, Z., Knobloch, H., Schramm, H. H. and Wiesinger, C., 2003, "Optimization of High-Voltage Self-Blast Interrupters by Gas Flow and Electric Field Computations", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 18, No. 4, pp. 1228~1235.
- (4) Liebermann, R. W. and Lowke, J. J., 1976, "Radiation Emission Coefficient for Sulphur Hexafluoride Arc Plasma", *JQRST*, Vol. 16, pp. 253~264.
- (5) Chevrier, P., Fievet, C., Ciobanu, S. S., Fleurier, C. and Scarpa, P., "Study of the arc-electrode interaction in a SF6 self-blast circuit breaker", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 32, pp. 1494~1502.
- (6) Murphy, A. B., 1993, "A Comparison of Treatments of Diffusion in Thermal Plasma", *J. Appl. Phys.*, Vol. 29, pp. 1922~1932.