

< 논문 >

유동 가이드가 열파퍼 플라즈마 챔버의 아크현상 이력에 미치는 영향

이 종 철[†] · 김 윤 제^{*}

(2007년 3월 21일 접수, 2007년 8월 17일 심사완료)

Effects of a Flow Guide on the Arcing History in a Thermal Puffer Plasma Chamber

Jong Chul Lee and Youn Jea Kim

Key Words: Plasma Chamber(플라즈마 챔버), Arcing History(아크현상 이력), Nozzle Ablation(노즐 용삭), Electrode Evaporation(전극 증발), Flow Guide(유동 가이드)

Abstract

The geometry and dimensions of an expansion chamber are decisive factors in thermal puffer plasma chamber designs. Because they together dominate the temperature and speed at which the cooling gas from the chamber flows back through a flow channel to the arcing zone for the successful interruption of fault currents. In this study, we calculated the flow and mass transfer driven by arc plasma, and investigated the effects of a flow guide installed inside a thermal puffer plasma chamber. It is found that the existing cold gas of the chamber mixes with hot gases entrained from the arcing zone and is subjected to compression due to pressure build-up in the chamber. The pressure build-up with the flow guide is larger than that without due to a vortex which rotates clockwise around the chamber center. By the reverse pressure gradient, the mixing gas of the chamber flows back out for cooling down the residual plasma near current zero. In the case with the flow guide, the temperature just before current zero is lower than that without, and the Cu concentration with high electrical conductivity is also less than that without the flow guide.

기호설명

- AZ : 아크발생 영역
- B_θ : 원주방향 자속밀도 [Wb/m^2]
- CC : 압축실
- c_1 : 난류변수 (=0.2)
- E : 전계분포 [V/m]
- EC : 팽창실
- F : 경험 상수 (=0.9)
- FG : 유동 가이드

- j_z : 축방향 전류밀도 [A/m^2]
- m_1 : 단위면적당 PTFE 용삭량 [kg/s]
- m_2 : 단위면적당 구리전극 증발량 [kg/s]
- q_v : 금속증발을 위한 에너지량 [W]
- Q' : 노즐 표면에 도달하는 총복사량 [W]
- R : 아크저항 [Ω]

그리스문자

- a : 흡수계수
- δ : 혼합 길이 [m]
- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- σ : 전기전도도 [S]
- ψ : 정전위 포텐셜 [V]
- μ : 점성계수 [$\text{N}\cdot\text{s/m}^2$]

[†] 책임저자, 회원, 강릉대학교 기계자동차공학부

E-mail : jcleee01@kangnung.ac.kr

TEL : (033)760-8466 FAX : (033)760-8461

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

μ_0 : 아크의 투자율 ($=4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

하첨자

l : 층류

t : 난류

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.⁽¹⁾ 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.⁽²⁾

산업용 기기분야의 전력용 개폐장치 중 하나인 가스차단기에는 단락사고 등이 발생할 경우 신속하고 정확하게 작동하여 고장전류를 차단하는 것이 주요 기능인데, 차단과정 중 절연성능이 우수한 SF₆ 가스로 채워진 아크 챔버 (arc or plasma chamber)에서는 접점 분리에 의하여 고온의 아크 플라즈마가 발생하게 된다. 발생된 플라즈마는 교류파형의 전류가 흐르는 대전류 구간 (high current period)동안 유지되며, 60 Hz 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 회복전압 (recovery voltage)이 전극 사이에 인가되는 것이 사고전류 차단성패에 중요한 검토 부분이다. 두 접점 사이의 절연성능은 전기전도도, 온도, 밀도 등의 영향을 받기 때문에 대전류 구간 동안 발생되었던 고온 영역들을 짧은 시간동안 충분히 냉각시켜 주어야만 인가되는 회복전압에 견디어 아크 플라즈마가 다시 발생하는 재발화 (reignition)가 일어나지 않는다.⁽³⁾

신뢰성 있는 챔버 설계 및 전류영점 직후 두 접점 사이의 절연성능을 확보하기 위해서는 대전류 구간에서의 아크현상 이력 (arcing history)을 파악하고, 전류영점 부근에서의 온도 및 전기전도도 분포를 고찰해야 한다. Zhang 등⁽⁴⁾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. 하지만 전류영점 부근의 절연성능에 관해서는 검토되지 않았으며, 챔버 내의 유동상태를 좌우하는 결정적 인자인 소호부의 형상이나 크기에 관한 연구는 시도되지 않았다. Sedlacek 등⁽⁵⁾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. 하지만 고온의 아크 플라즈마에 의한 PTFE 용삭 및 접점 이동 현상에 관한 충분한 고려가 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 열파퍼 플라즈마 챔버에 설치된 유동 가이드 (flow guide, FG)가 대전류 구간에서의 아크현상 이력과 전류영점 부근에서의 절연특성 (온도 및 전기전도도)에 미치는 영향을 파악하였다. 또한 고온의 플라즈마에 의한 주변 부품 (PTFE 노즐, 급속 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

열파퍼 챔버에서 발생하는 SF₆ 아크 플라즈마 및 열유동 특성을 해석하기 위해 요구되는 지배방정식은 크게 두 가지로 나눌 수 있다.⁽⁶⁾ 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, Ψ)을 추가적으로 계산함으로써 전류밀도 (J), 아크저항 (R), 전계분포 (E), 주울열 (σE^2) 등을 구하였다. 또한 이들 결과를 운동량 및 에너지 방정식의 생성항으로 결합하여 아크 플라즈마를 위한 로렌츠 힘과 주울열로 구성하였다.

Table 1 Definition of ϕ , Γ_ϕ and S_ϕ for governing equations

Equations	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
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_1	$\rho(D_l + D_t)$	0
Cu concentration	c_2	$\rho(D_l + D_t)$	0

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

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

Table 1에 해석을 위한 변수 (ϕ)에 따른 확산계수 (Γ_ϕ)와 생성항 (S_ϕ)을 나타내었으며, 자세한 기호 설명은 참고문헌⁽⁷⁾을 참고하기 바란다.

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 μ_0 는 아크의 투자율로 일정한 값으로 가정하였다 ($= 4\pi \times 10^{-7}$ H/m). 발생된 자기장은 아크 자체에 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 주열 열과 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 SF₆나 N₂ 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)⁽⁸⁾이 상당히 만족스러운 결과를 보여주고 있으며, 여기에 사용된 순방출계수 (net emission coefficient)는 Liebermann & Lowke⁽⁹⁾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 SF₆ 가스와 혼합된다. 본 연구에서는 PTFE 분자결합을 깨고, 단위질량의 3,400 K 온도를 가진 PTFE 용삭가스를 만드는데 소모되는 총에너지를 1.19×10^4 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 용손이 발생되는데 PTFE 노즐의 용삭현상과는

다르게 고체 전극으로의 에너지 수송은 열전도에 좌우되며, 주울열에 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.⁽¹⁰⁾ 구리 전극이 용융점 (1,356K)에 도달하면 증기발생이 시작되며 증발량 관계식은 다음과 같다.

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

여기서 h_v 는 전극 표면을 용융점까지 가열하고 (135 kJ/kg), 단위질량의 음극재료 (구리)를 상변화시키는데 (5,070 kJ/kg) 요구되는 총에너지이며, q_v 는 금속증발에 사용되는 에너지량이다.

고온의 아크 플라즈마에 의하여 노즐 및 전극에서 발생된 PTFE 및 구리 증기의 확산 (diffusion)은 작동가스인 SF₆에서 두 증기의 재분포에 매우 중요한 메커니즘이다. Murphy 등⁽¹¹⁾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.

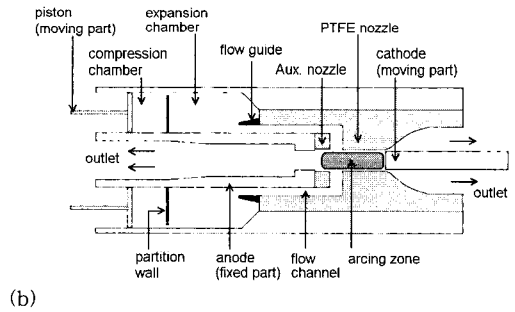
$$D_l = \frac{\mu_l}{\rho S c_l}, D_t = \frac{\mu_t}{\rho S c_t} \quad (6)$$

아크 플라즈마 영역에서의 난류 모델링 또한 매우 어려운 문제 중 하나이다. Yan 등은 Prandtl의 혼합거리모델을 수정하여 SF₆ 노즐 아크 유동에 성공적으로 적용하였다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 난류점성 (turbulent viscosity)을 구하기 위하여 아크영역을 5,000 K 이상으로 가정하였고, 식 (7)을 이용하여 계산하였다.

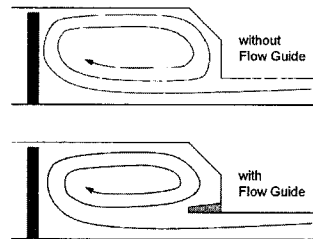
$$\mu_t = \rho(c_1 \delta) \left[2 \left(\frac{v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (7)$$

3. 결과 및 검토

3.1 유동 가이드에 의한 아크 현상 이력의 변화 지배방정식인 식 (1)의 보존방정식과 식 (2)의 전류연속식을 유한체적법 (Finite Volume Method, FVM)을 근간으로 하는 상용 CFD 코드인 PHOENICS (version 3.2)를 이용하여 계산하였다. 열과플라즈마 챔버의 복잡한 형상을 모델링하기 위하여 일반곡선좌표계 (Body Fitted Coordinates, BFC)에서 격자를 구성하였으며, 사용된 격자수는 축방향으로 155개, 반경방향으로 120개 (155×120)를 사용하였다. 아크영역에서의 급격한 온도구배에 대응하기 위하여 반경방향으로 시작되는 첫 10mm 구간동안 45개를 집중 배치시켰다. 팽창실과 노즐이 연결되는 유로에서의 격자 크기는 대략 1 mm × 0.8 mm이다. 해석영역 중 격자수에 가장 민감한 부분인 아크영역에서의 격자수 영향을 검토하기 위하여 양방향으로 두 배까지 늘려가며 검토하였다. 검토 결과, 최대 차이는 아크 온도인 경우 2%, PTFE 및 Cu 농도에서는 3% 정 (a)



(b)



(c)

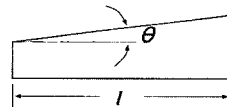


Fig. 1 Schematic of (a) a thermal puffer plasma chamber, (b) the flow control by a flow guide and (c) a flow guide.

도였으며, 다른 변수에 관한 차이는 무시될만한 수준이었다. 또한 시간증분에 관한 검토를 위하여 팽창실 압력상승 (pressure build-up)을 이용하여 비교하였다. 전체시간 13.1 ms를 1000~2000개의 단계로 나누어 계산하여 1500개의 시간 단계수 ($\Delta t=8.73 \times 10^{-6}$)를 선정하였다. 인텔 펜티엄 3.4GHz CPU (Dual-Core, RAM 4GB)를 이용하여 소요된 해석시간은 30시간 정도이다.

본 연구에 사용된 열파피 플라즈마 챔버와 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. 본 논문에서는 팽창실에 길이 17 mm, 높이 2 mm, 경사각 8°의 유동 가이드 (flow guide)를 설치하여, 대전류 구간 동안 아크발생 영역 (arcing zone, AZ)으로부터 유입되는 고온의 PTFE 용삭가스가 원활히 유입될 수 있게 하였다. 초기에 유입된 고온 가스는 팽창실 내에서 시계방향의 와류를 발생시키기 때문에 나

중에 유입되는 가스들과의 충돌로 인하여 연속적인 원활한 유입이 이루어지지 않기 때문이다.

Figure 2에 전체 아크발생 구간에서 나타나는 팽창실 압력상승을 나타내었으며, 그림 상부에 시간에 따른 음극 선단 (cathode tip)의 위치 변화를 하부에 나타낸 시간 및 전류값과 비교할 수 있도록 표시하였다. 해석과정에서 피스톤과 음극의 이동을 표현하기 위한 적절한 이동격자 (moving mesh) 기법이 요구된다. 본 연구에서는 격자변환기법⁽¹²⁾ (mesh transformation method)을 이용하여 그림 좌측과 같은 고정된 격자계에서 시간에 따라 물체가 이동하는 방향으로 격자의 성질 (유체 또는 고체)을 바꾸어 주는 방법을 채택하였다. 음극은 이동에 따라 격자의 성질만이 고체에서 유체로 바뀌도록 처리하였으며, 피스톤의 이동은 격자성질 변환 이외에 압축실의 압력상승을 유발하는 이동속도에 따른 운동량 추가를 고려하여 프로그래밍하였다.⁽¹³⁾ 좌측 y축의 전류비 (current ratio)는 최대 전류값 71.3 kA (=50 kA_{rms})를 기준으로 한 비를 의미하며, 우측 y축의 압력비 (pressure ratio)는 유동 가이드를 고려하지 않은 경우 발생한 팽창실 최대

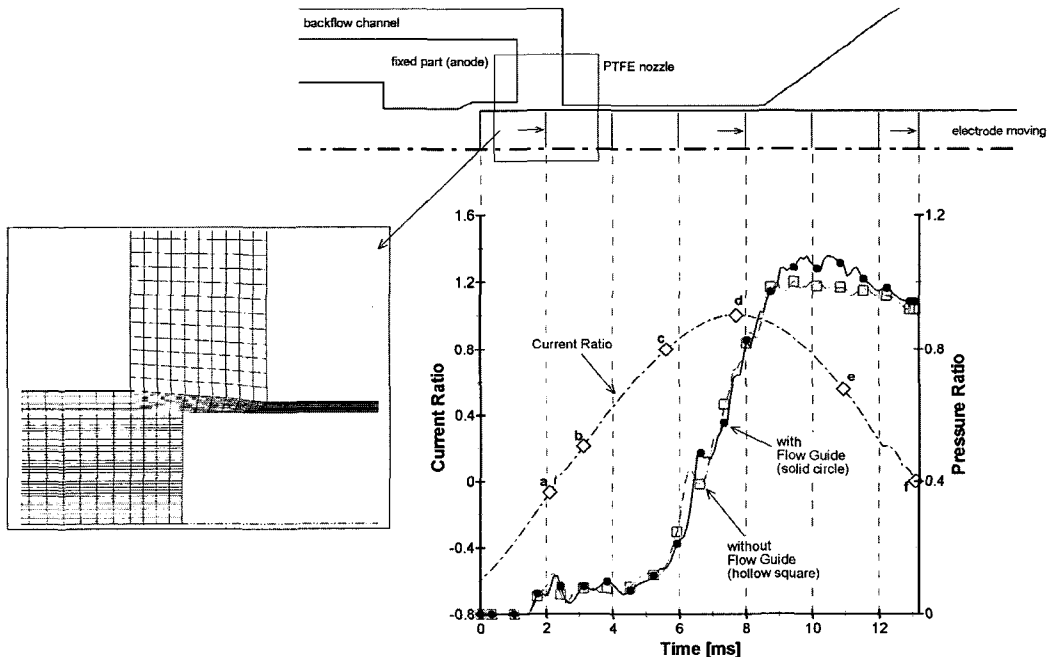


Fig. 2 Comparison of the pressure build-up inside EC for the whole arcing history. The position of the moving electrode and the instantaneous arcing current at different instants are indicated by the eight vertical lines

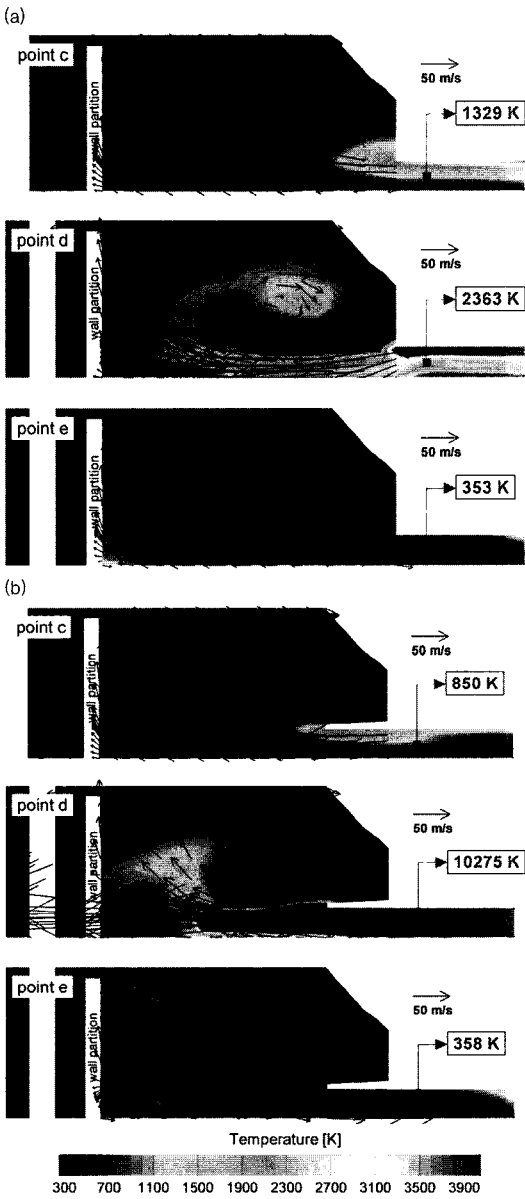


Fig. 3 Evolution of temperature for three instants (points a, c, and f): (a) without FG; (b) with FG

압력상승값 (챔버 초기 압력 0.69 MPa)을 기준으로 하는 비를 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), 최대 전류값을 나타내는 시점 "d"

($t=7.72$ ms, $I=71.3$ kA), 최대 전류값을 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 팽창실로 유입된다. 팽창실로의 유입은 최대 전류값을 지난 후에도 어느 정도 지속되며, 유입된 고온 가스는 기존에 존재하는 저온 작동가스를 압축하게 되므로 팽창실의 압력은 상승하게 된다. 압력상승을 나타내는 곡선에서 유동 가이드의 설치로 인하여 압력상승이 보다 오래 지속됨을 확인할 수 있으며, 최대 압력값 또한 커짐을 알 수 있다. 압력상승곡선의 진동현상은 유체 관성력과 유입되는 아크 에너지의 중첩에 의하여 발생하는 공력 공명 (aerodynamic resonance)으로 알려져 있다⁽¹⁴⁾. 팽창실의 압력상승은 전류영점 부근에서 팽창실로부터 아크발생 영역으로의 아크 냉각을 위한 흐름을 발생시키는데 사용되므로, 유동 가이드 설치에 의한 이러한 경향은 아크 차단에 긍정적인 효과가 있을 것으로 판단된다.

유동 가이드가 대전류 구간에서의 아크현상 이력에 미치는 영향을 Fig. 3을 이용하여 고찰하였다. 유동 가이드가 없는 경우에는 아크영역에서 유입되는 고온가스가 충분히 팽창실 내부로 들어오지 못하는 것을 볼 수 있는데, 이는 시계방향의 와류 발생으로 인하여 유입되는 가스들과 충돌이 발생하기 때문으로 생각된다. 이와 비교하여 유동 가이드가 설치된 경우에는 유동 가이드가 시계방향의 와류와 유입되는 가스들과의 충돌을 막는 역할을 하고 있기 때문에 아크영역에서 발생된 고온가스가 팽창실 깊숙이 침투하며, 보다 강하고 반경이 큰 와류를 발생시켜 기존 저온 작동가스와 혼합이 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 2의 압력상승 결과에서와 같이 유동 가이드가 설치된 경우에서 보다 큰 압력상승과 최대 전류값 이후 압력상승이 지속되는 시간 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 발생된 아크 플라즈마를 소호할 수 있는 차단능력의 개선을 의미한다.

3.2 유동 가이드에 의한 전류영점 부근의 절연 특성 변화

대전류 구간 동안 팽창실에 축적된 압력에너지에 의하여 유동 흐름의 방향이 시점 "e" 근처에서 전환되는데, 발생된 아크 플라즈마를 완전히 차단

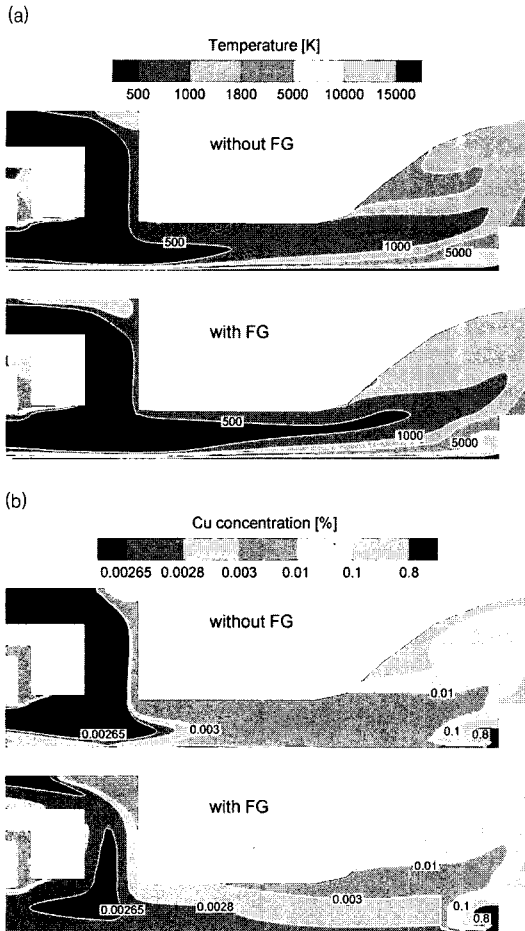


Fig. 4 Comparison of the results with and without FG at the end of current wave form (just before current zero): (a) temperature; (b) Cu concentration

하기 위해서는 이러한 소호력 (blow-off force)이 충분해야 한다. 팽창실에서 아크발생 영역으로의 유동흐름은 접점 사이의 고온부를 냉각시키고, 작동가스의 절연능력을 회복시킨다.

Figure 4에 전류영점 직전의 아크발생 영역에서의 온도분포와 금속증기 농도를 나타내었다. 온도와 금속증기 분포는 전기전도도와 밀접한 관계를 가지며, 크기에 따라 절연능력을 평가할 수 있는 척도로 사용될 수 있다. Figure 4(a)의 두 접점 사이 온도분포를 살펴보면 유동 가이드가 존재한 경우가 보다 낮은 온도를 나타내고 있으며, Fig. 4(b)의 농도분포에서도 유동 가이드가 존재한 경우가 보다 작은 금속증기농도를 나타내고 있다.

이는 대전류 구간의 아크현상 이력과 밀접한 관계가 있음을 나타내는 것이며, 보다 높은 팽창실 압력상승으로 인하여 소호력이 증대되었고, 증대된 소호력으로 아크발생 영역의 냉각과 발생된 금속증기를 빠르게 제거했기 때문에 사료된다. 따라서 설치된 유동 가이드는 아크 플라즈마 챔버의 성능 증대에 긍정적인 효과를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 열과퍼 플라즈마 챔버에서 발생하는 아크 플라즈마를 모델링하기 위하여 Navier-Stokes 방정식과 Maxwell 방정식을 연계하여 수치해석을 수행하였다. 챔버에 설치된 유동 가이드가 대전류 구간에서의 아크현상 이력과 전류영점 부근에서의 온도 및 금속증기 분포에 미치는 영향을 파악하였으며, 아래와 같은 결과를 도출하였다.

(1) 설치된 유동 가이드는 챔버 내에서 발생하는 시계방향의 와류와 연속적으로 유입되는 고온가스들과의 충돌을 막는 역할을 하고 있기 때문에 팽창실의 압력상승 시간을 보다 오랫동안 지속시켰고, 최대 압력값을 증가시키는 역할을 하였다.

(2) 유동 가이드에 의하여 아크영역에서 발생된 고온가스가 팽창실 깊숙이 침투하며, 보다 강하고 반경이 큰 와류를 발생시켜 기존의 저온 작동가스와 혼합이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

(3) 유동 가이드 설치로 인한 대전류 구간에서 증가된 압력상승은 전류영점 부근에서의 냉각효과를 증대시키고 전기전도도가 높은 금속증기의 농도를 낮추는 역할로 이어짐을 확인하였다.

(4) 본 연구의 결과는 향후 가스 및 진공을 절연 매체로 하는 아크 플라즈마 현상뿐만 아니라 아크 플라즈마 공정을 이용한 나노입자 생성반응 모델링으로도 확장될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Boulos, M. I., Fauchais, P. and Pfender, E., 1994, *Thermal Plasmas: Volume 1*, Plenum Press, New York.
- (2) Oh, H., Jung, J., Park, 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.
- (3) Bernard, G., 1995, Breaking by Auto-Expansion, *Cahier Technique Merlin Gerin*, No. 171.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Lee, J. C. and Kim, Y. J., 2005, "Numerical Modeling of Sf_6 Thermal Plasma Generated During the Switching Process," *Thin Solid Films*, Vol. 475, No. 2, pp. 72~80.
- (7) Lee, J. C. and Kim, Y. J., 2006, "Effects of Nozzle Shape on the Interruption Performance of Thermal Puffer-Type Gas Circuit Breakers," *Vacuum*, Vol. 80, No. 6, pp. 559~603.
- (8) Zhang, J. F., Fang, M. T. C. and Newland, D. B., 1987, "Theoretical Investigation of a 2 Ka Arc in a Supersonic Nozzle," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 20, pp. 368~379.
- (9) Liebermann, R. W. and Lowke, J. J., 1976, "Radiation Emission Coefficient for Sulphur Hexafluoride Arc Plasma," *JQRST*, Vol. 16, pp. 253~264.
- (10) Hsu, K. C., Etemadi, K., and Pfender, E., 1983, "Study of the Free-Burning High- Intensity Argon Arc," *J. Appl. Phys.*, Vol. 54, pp. 1293~1301.
- (11) Murphy, A. B., 1993, "A Comparison of Treatments of Diffusion in Thermal Plasma," *J. Appl. Phys.*, Vol. 29, pp. 1922~1932.
- (12) Lee, J. C., Ahn, H. S., Oh, I. S. and Choi, J. W., 2002, "Development of a CFD Program for Cold Gas Flow Analysis in a High Voltage Circuit Breaker Using CFD-CAD Integration," *Transaction of The KIEE(B)*, Vol. 51, No. 5, pp. 242~248.
- (13) Kim, Y. G. and Hur, N. G., 2001, "a Numerical Analysis on Flows Around a Moving Body Using a Mesh Transformation Method," *Transaction of The KSME(B)*, Vol. 25, No. 4, pp. 593~599.
- (14) Ryan, H. M. and Jones, G. R., 1989, *Sf₆ Switchgear*, Peter Peregrinus Ltd., London.