

PASB 아크 플라즈마 챔버에서 발생하는 유동 및 물질전달에 관한 연구

이종철* · 김윤제**

Study on the Flow and Mass Transfer in a PASB Arc Plasma Chamber

Jong-Chul Lee*, Youn J. Kim**

KeyWord : Arc plasma(아크 플라즈마), Flow and mass transfer(유동 및 물질전달), Nozzle ablation(노즐 용삭), Electrode evaporation(전극 용손)

ABSTRACT

The computational investigation is performed to find out the interaction of arc plasmas with surrounding materials and the thermal flow characteristics in a PASB (Puffer-Assisted Self-Blast) chamber, which is one of new breaking concepts in SF₆ switchgears. It is very important to define the flow and mass transfer happened during the full arcing history for further understanding complex physics inside the chamber. In this study, we have considered two diffusion processes by the hot arc plasma, one is PTFE nozzle ablation and the other is Cu electrode evaporation, simultaneously. It was found that the principle of the pressure-rise inside the chamber is confirmed by the computational results and the increase of the electrical conductivity of the residual gas near current zero is critical to the chamber design.

1. 서론

아크 플라즈마 내의 금속증기 존재는 열에너지에 의한 금속전극 표면에서 용융이 발생하기 때문이며, 발생한 금속증기는 주변 가스보다 전기전도도가 매우 높기 때문에 플라즈마 자체 및 주변 가스의 전기적 전 특성은 물론 온도와 압력 등에 상당한 영향을 미친

다⁽¹⁾. 특히 산업용 기기분야의 전력용 개폐장치 중 하나인 가스차단기에서는 고장전류가 발생한 경우 신속하고 정확하게 작동하여 두 금속전극 사이에 발생하는 고온의 아크 플라즈마를 소호(quenching)해야 하므로 플라즈마와 주변 재료들의 강한 열적·화학적 상호변화를 수반한다. 이와 같이 고온 플라즈마와 주변 재료들의 상호작용은 이론, 실험 및 해석적 연구를 통하여 학문적으로 고찰해야할 부분들이 아직 많이 남아있고, 이를 응용하여 기술적으로도 발전해야 할 많은 분야가 있다.

* 강릉대학교 기계자동화공학부

** 성균관대학교 기계공학부 (교신저자)

E-mail: yjkim@skku.edu

SF₆ 아크 플라즈마에 관한 연구는 주로 가스차단기의 차단과정에서 발생하는 아크 플라즈마의 원리 및 소호 특성을 판명하기 위해서 진행되어 왔다. 실험적 연구를 위해서는 급전적 비용과 공간적 여유를 크게 요구하는 고전압 대전류 시험설비가 필요하기 때문에 해석적 방법을 구축하는 연구가 대학기관과 제작 업체의 연구소에서 상대적으로 많이 수행되었다. 영국의 리버풀대학교 Fang 연구그룹^(2,3)은 1990년대 초반부터 상용 CFD 프로그램인 PHOENICS를 이용하여 SF₆ 노즐아크 연구 및 플라즈마 유동해석을 위한 난류모델, 복사모델 등에 관한 연구를 수행하였다. 독일의 아헨공대 연구그룹⁽⁴⁾도 1990년대 초반부터 실험적 연구를 수행하였고, 근래에는 CFX 코드를 이용하여 초고압 차단부에서 발생하는 아크 현상을 연구하고 있다. 하지만 아직까지 두 전극 사이에서 발생된 고온의 아크 플라즈마에 의한 주변 재료들의 상변화 현상 및 발생된 용삭 (ablation)·용손(evaporation) 가스에 의한 플라즈마 특성 변화에 관한 결과를 도출하기에는 학문적·기술적으로 어려움이 따른다. 특히 가스차단기에서 차세대 소호방식으로 부각되고 있는 PASB (Puffer-Assisted Self-Blast) 챔버는 기계적 압축 (mechanical compression) 이외에 고온의 플라즈마에 의해 발생하는 PTFE 노즐 용삭가스의 열적 압축 (thermal compression)을 병용하기 때문에 아직 관련 이론 및 물리적 현상 확립이 명확하지 못하다.

본 논문은 PASB 아크 플라즈마 챔버에서 발생하는 유동 및 물질전달 현상을 파악하기 위한 연구로서 고온의 플라즈마에 의한 주변 부품 (PTFE 노즐, 금속 전극)의 용삭 및 용손 발생을 추가하여 해석하였다. 작동가스인 SF₆ 가스 내의 PTFE 농도와 금속증기 농도를 계산하기 위한 보존 방정식을 기존의 지배방정식 (질량, 운동량, 에너지)에 추가하고, 혼합가스의 물성치 등은 국소 열적·화학적 평형상태라 가정하였다.

2. PASB 챔버의 압력상승 원리

본 연구에 사용된 PASB 챔버의 개략도와 전류파형을 Fig. 1에 나타내었다. 한 쌍의 구리 금속전극 (이동 전극과 고정전극), PTFE 노즐, 피스톤으로 구성되어 있으며, 압축력을 얻기 위한 챔버는 격벽에 의하여 압축실(compression chamber)과 팽창실(expansion chamber)로 구분된다. 초기 상태에서 두 전극은 접촉되어 있으며, 사고전류가 발생했다는 신호에 의해 전극 분리가

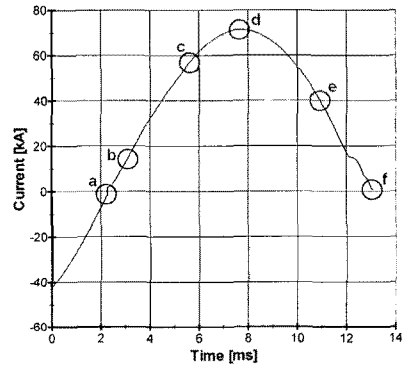
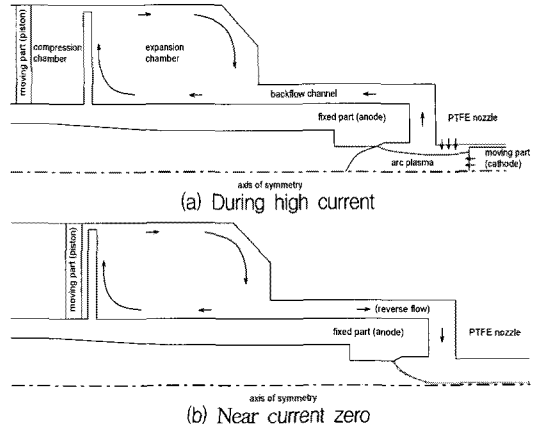


Fig. 1 (a) Schematic of a PASB chamber and (b) the applied current waveform

시작된다. 두 전극이 분리됨에 의해 두 전극 사이에는 지속되려는 전류에너지 흐름에 의한 아크 플라즈마가 발생되며, 이동접점이 완전히 이동을 끝마칠 때까지 아크 발생 영역 (arcing zone)은 확대된다. 두 접점 사이의 아크 발생은 입력되는 사고전류의 교류신호 크기에 의해 시간적으로 변화되며, 5kA 이상의 대전류 영역에서는 고온의 아크 플라즈마와 주변에 위치한 PTFE 노즐이 반응하여 용삭가스를 발생시킨다. 금속 접점 또한 고온의 아크 플라즈마에 의해 용융되어 용손가스가 발생한다 (Fig. 1(a)).

아크 발생 영역에 발생된 고온의 플라즈마는 주변의 작동가스 (SF₆)를 가열 및 분해하여 절연능력을 저하시키기 때문에 전류영점의 시점에서 수행되어야만 하는 소호작용을 어렵게 한다. 이를 극복하기 위하여 고안된 PASB 챔버는 피스톤의 기계적 운동으로 인한 압축실의 압력상승 발생 이외에 추가적으로 대전류 영

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

Equations	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Continuity	1	0	0
Axial momentum	w	$\mu+\mu_t$	$\partial p/\partial z + (J \times B_\theta)_z + \text{viscous terms}$
Radial momentum	v	$\mu+\mu_t$	$\partial p/\partial r + (J \times B_\theta)_r + \text{viscous terms}$
Enthalpy	h	$(k+k_t)/c_p$	$dp/dt + \sigma E^2 - q + \text{viscous dissipation terms}$
PTFE concentration	c_1	$\rho(D+D_t)$	0
Cu concentration	c_2	$\rho(D+D_t)$	0

역에서 발생하는 고온의 아크에너지를 팽창실에 압력 에너지로 축적하고, 이를 전류영점 부근 시점에서 아크 발생 영역으로의 소호용 냉각 가스 흐름을 형성하게 한다⁽⁵⁾ (Fig. 1(b)).

3. 수치해석

3.1. 지배방정식

PASB 챔버에서 발생하는 SF₆ 아크 플라즈마 및 열 유동 특성을 해석하기 위해 요구되는 지배방정식은 크게 두 가지로 나눌 수 있다⁽⁶⁾. 하나는 유동장을 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 상용 CFD 코드인 PHOENICS를 이용하여 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), 주열열 (σE^2) 등을 구하였다. 또한 이들 결과들을 운동량 및 에너지 방정식의 생성항으로 결합하여 아크 플라즈마를 위한 로렌츠힘과 주열열로 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 (ϕ)에 따른 확산계수 (Γ_ϕ)와 생성항 (S_ϕ)을 나타내었으며, 자세한 기호 설명은 참고문헌^(6,7)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 유동의 흐름에 영향을 미치며, 이것은 Table 1의 운동량 방정식의 생성항으로 포함시켰다.

3.2. 복사 및 기타 모델링

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

작동가스가 SF₆나 N₂ 가스인 경우, 아크 플라즈마로부터 방출되는 복사 스펙트럼이 적외선으로부터 자외선까지 분포하고 있고, 흡수계수가 좁은 영역에서도 수백 배까지 변화되기 때문에 복사 모델링의 문제 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⁽⁸⁾가 제시한 값을 사용하였다. 본 연구에서도 순방출계수를 이용한 근사 복사모델을 적용하였다.

아크 발생 영역은 절연성능이 우수한 PTFE 노즐로

둘러 싸여 있으므로 아크 발생 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 3,400K 온도를 가진 PTFE 용삭가스를 만드는데 소모되는 총에너지로 1.19×10⁴ [kJ/kg]이라 가정하였으며, 이에 사용되는 용삭량 관계식은 아래와 같다.

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

여기서 Q'는 노즐 표면에 도달하는 총복사량 [W/m²]이며, F는 경험적 상수로서 0.9를 사용하였다.

금속 전극 또한 고온의 아크에너지에 의하여 용손되는데 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. 구리 전극이 용융점 (1,356K)에 도달하면 증기발생이 시작되며 증발량 관계식은 아래와 같다.

$$\dot{m}_2 = q_w/h_w \quad (5)$$

여기서 h_w는 전극 표면을 용융점까지 가열하고 (135 kJ/kg), 단위질량의 음극재료 (구리)를 상변화 시키는데 (5,070 kJ/kg) 요구되는 총에너지이며, q_w는 금속증발에 사용되는 에너지 플럭스 [W/m²]이다.

작동가스인 SF₆, PTFE 증기, 구리 증기 등이 혼합된 가스상태에서 확산은 두 증기의 재분포에 매우 중요한 메커니즘이다. Murphy⁽⁹⁾ 등은 국소 열적·화학적 평형상태 하에서 혼합 확산계수는 두 기체의 혼합물속에서 한 기체에 내포하는 종(species)의 확산 정도를 기술하는데 사용될 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 확산계수를 직접 부여하지 않고 Schmidt수를 지정하여 계산하였으며, 층류와 난류에 관하여 각각 1의 값을 사용하였다.

아크 플라즈마 영역에서의 난류모델링 또한 매우 어려운 문제 중 하나이다. Yan 등⁽²⁾은 Prandtl's mixing length model을 수정하여 SF₆ 노즐 아크 유동에 성공

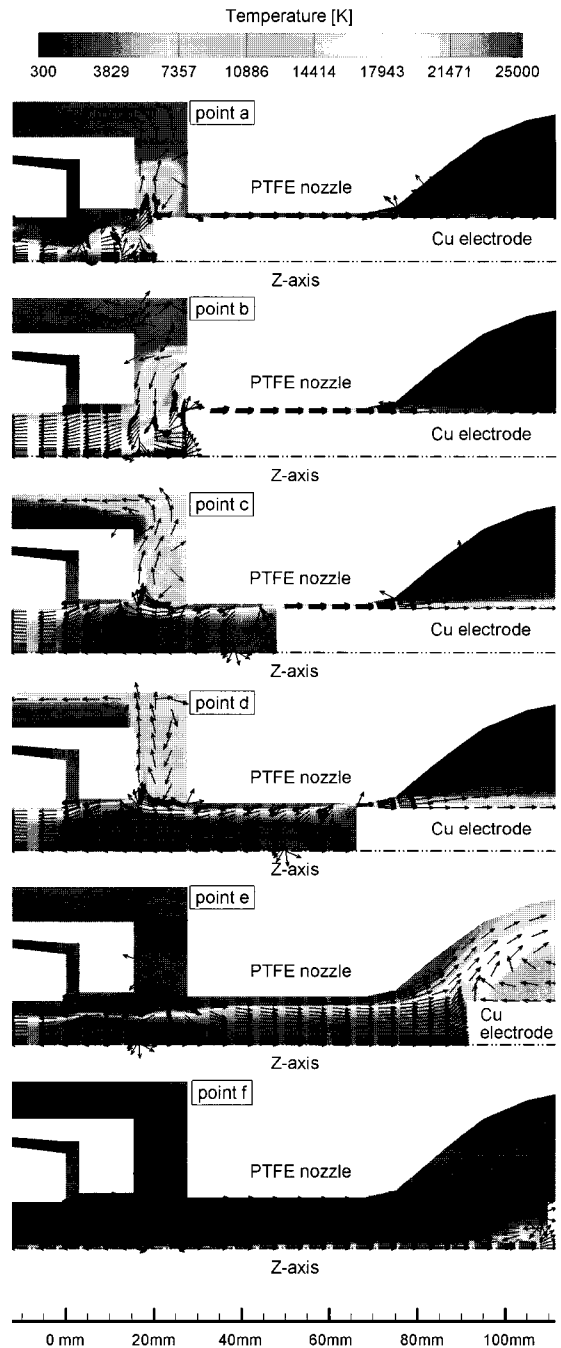


Fig. 2 Evolution of the arc column in terms of temperature and flow pattern for five instants (points a~f)

적으로 적용하였다. 본 연구에서도 아크영역을 5,000K 이상으로 가정하여 혼합거리와 난류점성을 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 아크 플라즈마 및 유동 특성의 시간적 변화

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 온도분포 및 유동양상을 Fig. 2에 나타내었다. 검토에 사용된 시점 "a"에서 "f"의 시간과 전류크기는 Fig. 1을 참고하기 바란다.

접점 이동의 초기 단계인 시점 "a" ($t=2.12\text{ms}$, $I=4.8\text{kA}$)에서는 음극 (이동전극)이 PTFE 노즐을 폐쇄한 상태이므로 양극 (고정전극)과 음극 사이에서 발생한 아크 에너지의 대부분은 좌측의 유동 출구로 빠져 나가며, 일부분은 상부 유로를 따라 팽창실로 유입되는 것을 볼 수 있다. 시점 "b" ($t=3.12\text{ms}$, $I=15.1\text{kA}$)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" ($t=5.62\text{ms}$, $I=57.0\text{kA}$)는 전류가 상승하는 부분으로서 아크 영역에 공급된 큰 에너지가 좌측 유출구 및 상부 유로로의 활발한 흐름을 발생시키고 있음을 확인할 수 있다. 시점 "d" ($t=7.72\text{ms}$, $I=71.3\text{kA}$)에서는 최대 전류값이 입력되기 때문에 더욱 활발한 상부 유로를 통한 팽창실로의 에너지 유입을 나타내고 있다. 시점 "e" ($t=10.9\text{ms}$, $I=39.7\text{kA}$)는 전류최대치를 지나 에너지 입력이 하향곡선에 접어선 시점이며, 이동전극이 PTFE 노즐목을 빠져 나온 상태이므로 좌우 유출구로의 유출량이 증가한다. 따라서 그 동안 축적된 팽창실의 압력 에너지가 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" ($t=13.1\text{ms}$, $I=0.1\text{kA}$)은 전류영점 직전으로 이전의 대전류 구간 동안 축적된 팽창실의 압력에너지에 의하여 아크 영역으로의 흐름을 발생시켜 두 접점 사이에 발생되었던 고온의 플라즈마를 냉각시키고 작동가스의 절연능력을 원활히 회복시키는 역할을 수행하는 것을 확인할 수

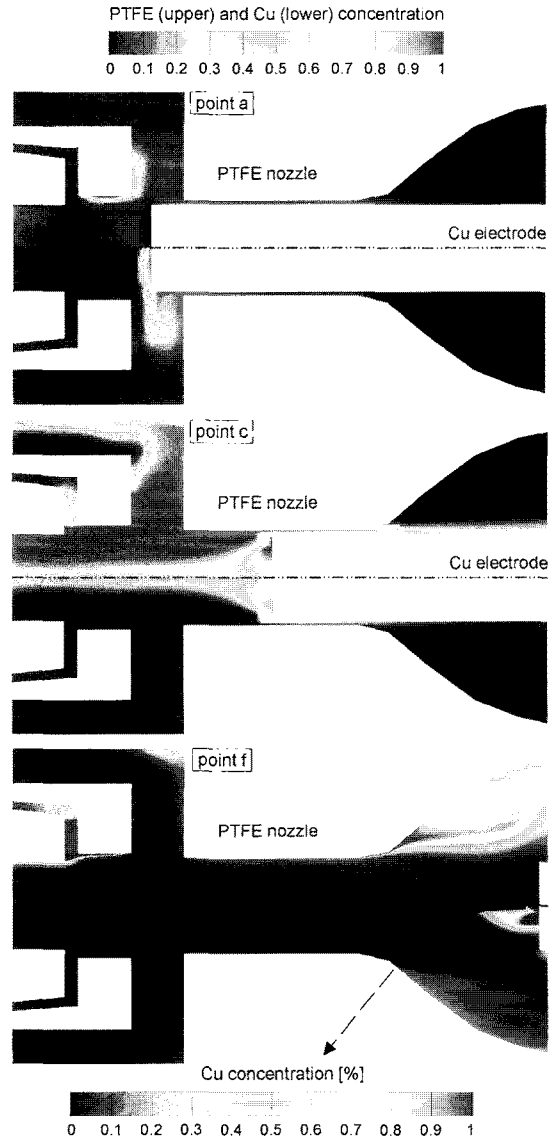


Fig. 3 Evolution of concentrations in terms of PTFE (upper) and Cu (lower) for three instants (points a, c, and f)

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 유용하게 사용할 수 있다.

4.2. 용삭 및 용손 현상의 시간적 변화

아크 발생 영역은 절연성능이 우수한 PTFE 노즐로

둘러 싸여 있으므로 아크 발생 기간 동안 복사에너지에 의해 노즐이 용삭되고, 노즐 표면에서 용삭이 발생되면 증발된 PTFE 가스는 대류와 확산에 의해 SF₆ 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.

Fig. 3은 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. 2에서 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 발생되는 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 아크 에너지가 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 소호에 커다란 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서 계산된 전체 아크 이력 (whole arcing history) 동안 발생된 금속전극의 증발량을 입력전류파형과 함께 Fig. 4에 나타내었으며, 정량적 비교를 위한 추가 연구가 요구된다.

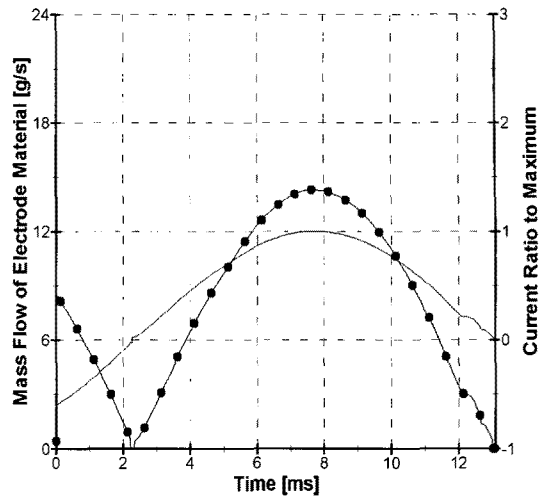


Fig. 4 Calculated mass flow of electrode material (solid circle and line) during the whole arcing history (solid line)

5. 결론

본 연구에서는 가스차단기에서 차세대 소호방식으로 부각되고 있는 PASB 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.

PASB 챔버에서의 아크 플라즈마 및 유동 특성의 시간적 변화를 분석한 결과 PTFE 노즐목이 폐색된 상태에서는 발생된 아크에너지가 상부 유로를 통해 팽창실로 유입됨을 확인하였다. 또한 노즐목 개방 이후에는 입력전류의 하향곡선과 맞물려 유동 흐름이 반대로 팽창실에서 아크 영역으로 발생하였으며, 이는 PASB 챔버의 전형적인 가스 흐름 양상이다. 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. 또한 전류영점 부근에서의 두 접점 사이 금속증기 분포는 작동가스의 전기전도도와 절연 능력에 커다란 영향을 미침이 자명하므로 계산된 전체 아크 이력 동안 발생된 금속전극 증발량의 정량적 비교를 위한 추가 연구가 요구된다.

참고문헌

- (1) Boulos, M. I., Fauchais, P., and Pfender, E., Thermal Plasmas: Volume 1, Plenum Press, New York, 1994.
- (2) Yan, J. D., Nuttall, K. I. and Fang, M. T. C., 1999, "A Comparative Study of Turbulence Models for SF₆ Arcs in a Supersonic Nozzle," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 32, pp. 1401~1406.
- (3) 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.
- (4) Luders, C., Suwanasri, T. and Dommerque, R., 2006, "Investigation of an SF₆-selfblast Circuit Breaker," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 39, pp. 666~672.
- (5) Gajic, Z., 1998, "Experience with Puffer Interrupter Having Full Self-Compensation of Resulting Gas Pressure Force Generated by the Electrical Arc," CIGRE, Session 13, No. 103.
- (6) 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.
- (7) Lee, J. C. and Kim, Y. J., 2007, "The Influence of Metal Vapors Resulting from Electrode Evaporation in a Thermal Puffer-type Circuit Breaker," Vacuum, Vol. 81, No. 7, pp. 875~882.
- (8) Liebermann, R. W. and Lowke, J. J., 1976, "Radiation Emission Coefficient for Sulphur Hexafluoride Arc Plasma," JQRST, Vol. 16, pp. 253~264.
- (9) Murphy, A. B., 1993, "A Comparison of Treatments of Diffusion in Thermal Plasma," J. Appl. Phys., Vol. 29, pp. 1922~1932.