

아크 플라즈마에 의한 PTFE 노즐 용삭현상

이 증 철¹, 김 윤 제^{1*}

ABLATION OF PTFE NOZZLE DRIVEN BY ARC PLASMA

J.C. Lee and Y.J. Kim

It has been the most progressive interruption technique to use the ablation gas from the surface of PTFE nozzle driven by arc plasma during switching process in SF₆ gas circuit breakers. This advanced interruption technique can reduce the required mechanical energy to compress and blow the gas for extinguishing the arc plasma between the electrodes due to using the ablation effect instead. In order to consider the phenomena during calculation of switching process, it is required to confirm the principles of ablation from PTFE nozzle as well as of arc plasma during switching process. In this study, we have calculated the switching process considered the ablation of PTFE nozzle driven by arc plasma using multidisciplinary simulation technique and compared the results with the data without the ablation effect. More 50% difference of pressure rise inside expansion chamber has been found from the results and it should be indispensable for this type of computational work to consider and include the ablation effect of PTFE nozzle. Further study on turbulence and radiation will be followed.

Key Words: 가스차단기(Gas Circuit Breaker), 아크 플라즈마(Arc Plasma), PTFE(Polytetrafluoroethylene), 열과퍼 방식(Thermal Puffer Type), 용삭(Ablation), 로렌츠힘(Lorentz Force), 주울열(Ohmic Heating)

1. 서 론

산업용 기기분야의 전원용 전기기기로 분류되어 있는 전력용 개폐장치 중 하나인 가스차단기(Gas Circuit Breaker, GCB)의 주요 책무 중 하나인 고장전류차단 과정에서 발생하는 아크 플라즈마에 의해 유발되는 열, 유동 및 복사에너지에 의한 PTFE 노즐의 용삭가스 특성을 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 해석하기 위한 수치기법에 관하여 다루고자 한다.

아크 플라즈마를 포함한 고장전류차단 과정에서 발생하는 복합적인 메커니즘을 파악하기 위한 실험적인 접근법은 차단 기술의 발전과 더불어 고도화되고 있지만, 대용량·초고압화를 위해서는 대단위 설비투자 및 환경, 안전 문제가 커다란 걸림돌이 되고 있다. 따라서 최근의 컴퓨터 성능과 수치기법의 발전에 힘입어 해석적 접근법에 관한 연구가 활발히 진행되고

있으며, 이를 수치적 시험(Numerical Testing or Digital Testing)으로 명명하기도 한다[1].

아크 플라즈마를 수치적으로 다루기 위해서는 이에 대한 모델링이 필요하며, 유체흐름 및 열역학 법칙에 관련된 방정식을 이용하는 물리적 모델(Physical Model)과 전기적 관점에서의 에너지 평형식을 이용하는 블랙박스 모델(Black-box Model)로 나누어진다[2]. 고장전류차단 과정에서의 메커니즘 파악과 새로운 아이디어의 발굴에는 물리적 모델이 더 적합하며, 이를 위해서는 아크 플라즈마의 전기적 특성과 이로 인해 발생하는 열, 유동 및 기타 물질전달 특성을 결합하여 해석할 수 있는 고도의 수치기법이 요구된다.

2000년대 초반부터의 연구경향을 토대로[3-5] 본 연구에서는 기존 시스템에 비하여 상당히 (약 5배) 축소화·저조작력화가 가능하여 차세대 소호방식으로 부각된 열과퍼(Thermal Puffer) 방식의 차단과정을 계산할 수 있는 해석기법을 확립함으로써 용삭가스가 압력상승 및 소호성능에 미치는 영향을 파악하고자 한다. 이로부터 얻은 연구결과는 값비싸고 위험한 단락시험에 의하지 않고도 취약한 부분을 찾아내 수정이 가능하므로 설계 및 제작 상의 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라

1 정회원, 성균관대학교 기계공학부

* Corresponding Author E-mail: yjkim@skku.edu

Table. 1 Definitions of variable, diffusion coefficient, and source term for governing equations

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

측정이 어려운 아크 플라즈마의 여러 특성 및 소호원리를 파악하는데 유용한 도구로 사용될 수 있다.

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(ϕ)에 따른 확

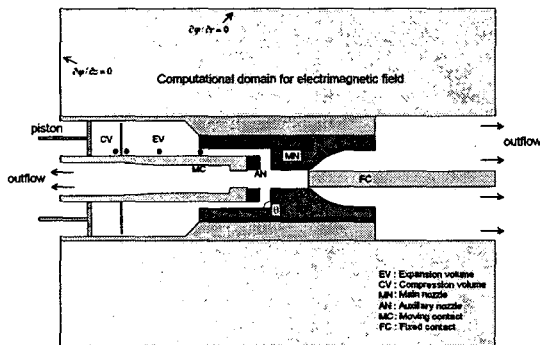


Fig. 1 Schematic diagram of the thermal puffer type circuit breaker under investigation

산계수(Γ_ϕ)와 생성항(S_ϕ)을 나타내었으며, 자세한 기호설명은 참고문헌[3-5]을 참고하기 바란다.

본 연구에서는 접점 사이에서 발생하는 아크에너지(에너지 방정식의 σE^2 항)를 계산하기 위하여 전위분포(electrostatic potential)를 계산하는 방법을 사용하였다. 극간의 전위분포(ϕ)를 구함으로써 전류밀도 J 와 아크저항 R 로부터 전계분포(E)를 구하며, 최종적으로는 주울열(σE^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[6]에 의해 제시된 값을 사용하였다. 발생한 전계와 자계에 의한 로렌츠힘을 고려하여, 접점 사이에서 발생한 아크에 자기펌핑(magnetic pumping)효과를 나타낼 수 있도록 전류밀도 J 와 아크전류에 의한 원주 방향 자계 B 를 구하였다.

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

고온고압의 아크 플라즈마의 특성을 나타내는 열적 및 이송적 성질(thermodynamics and transport properties)은 Frost & Liebermann[7]이 제안한 순수 SF₆ 가스 데이터를 기준으로 SF₆-PTFE 혼합가스에 관한 Zhang 등[8]이 제안한 계산결과를 사용하였다. 또한 아크에 의한 난류특성을 모델링하기 위하여 Fang 등이 제안한 수정된 프란틀 혼합거리 모델[9]과 표준 k- ϵ 모델을 사용하여 비교하였다.

2.2 PTFE노즐 용삭 모델링

파퍼 실린더의 기계적인 조작력을 저감하기 위하여 제안된 새로운 소호방식들은 아크에너지에 의하여 증발되는 강화테

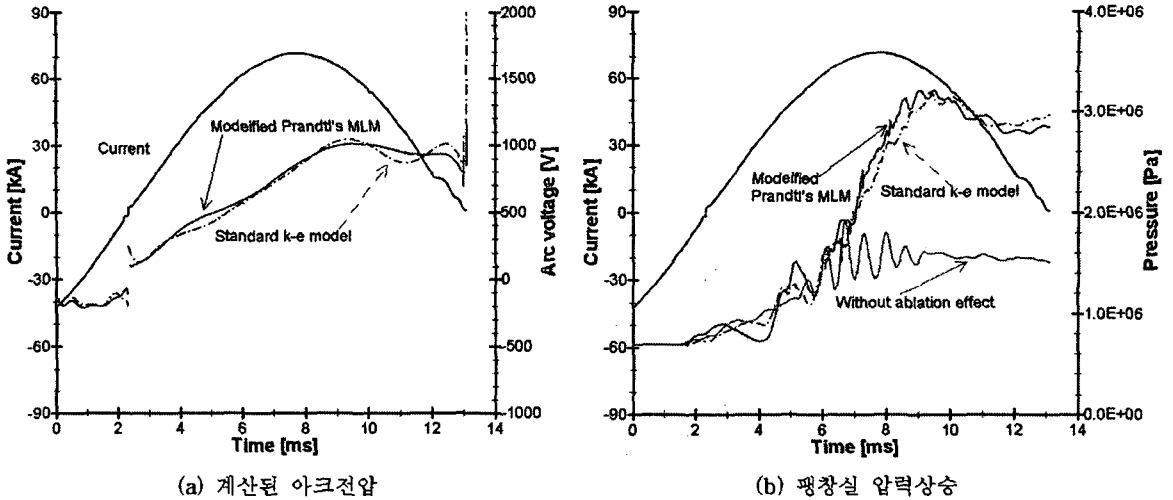


Fig. 2 Calculated arc voltage and pressure-rise inside the expansion chamber during whole switching process

프론(polytetrafluoroethylene, PTFE)노즐의 용삭현상을 이용하여 상대적으로 작은 조작에너지로 더 큰 파피 실린더 압력상승을 유도하고 있다. 따라서 용삭가스에 의한 파피 실린더 압력상승과 아크의 냉각을 수치계산하기 위한 모델링이 추가적으로 검토되어야 한다. 노즐재료인 PTFE는 600K에서 증발하며 그 사이에 증발에너지(5.73×10^4 [J/kg])를 아크로부터 빼앗는다. 또한 발생된 PTFE 용삭가스는 가스 흐름 속으로 유입되는데 3,400K에서 해리가 일어나고, 해리 에너지를 아크로부터 빼앗는다. Ruchi & Niemeyer[10]의 실험적 연구에 의하면 방출되는 PTFE 용삭가스의 온도는 $3400K \pm 200K$ 라고 보고되고 있다. 방출된 용삭가스는 주변의 SF_6 가스와 대류와 확산에 의하여 혼합되게 되므로 이를 위한 질량농도방정식이 필요하다(표1 참고). 그리고 노즐로부터 방출되는 용삭가스의 양은 다음 식으로부터 구할 수 있다[7].

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

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 총 에너지로 약 1.19×10^7 [J/kg]이다. 또한 F 는 실험상수로서 본 연구에서는 0.9를 사용하였다.

3. 결과

3.1 팽창실 내부의 압력변화

열파피식 소호부에서 팽창실과 압축실은 가변밸브로 연결되어 있으며, 소전류 차단구간을 제외하고는 가변밸브가 닫혀 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 Chery 등[11]은 순수 SF_6 , CF_4 , C_2F_6 의 순방출계수가 혼합가스인 SF_6-CF_4 , $SF_6-C_2F_6$ 와 거의 유사함을 발표하였고, 대전류 구간에서는 아크의 온도가 18,000K 이상이기 때문에 본 연구에서는 SF_6 -PTFE 혼합가스의 순방출계수가 순수 SF_6 와 같다고 가정하였다.

해석모델의 아크시간(arcing time)은 13.1 [ms]이며, 투입전류는 최대 50kA_{rms}이다. 전체 계산구간에서의 아크전압에 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 점접 사이에 발생한 아크 플라즈마의 소호특성을 좌우하는 가장 큰 변수로서 열파피식 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. 노즐폐쇄 현상 등에 의한

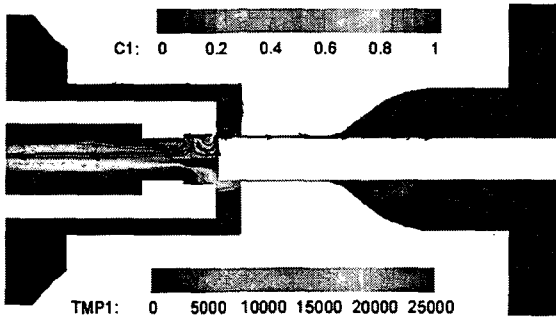
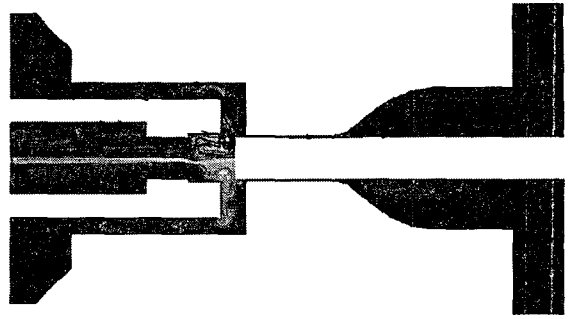
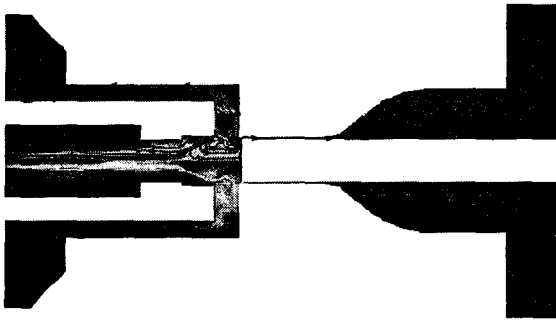
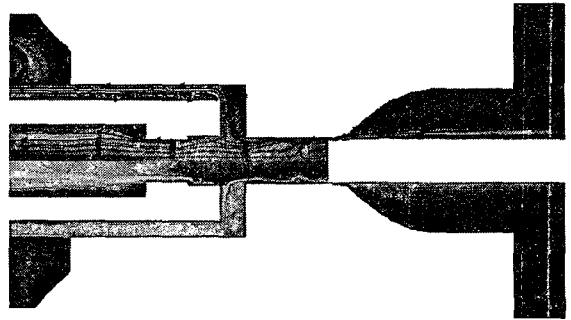
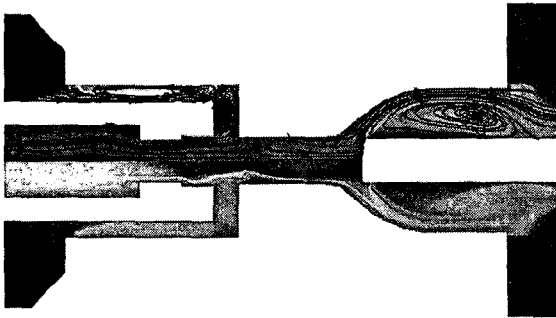
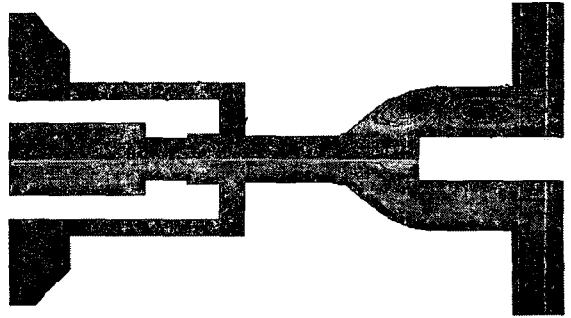
(a) $I = -13\text{kA}$ (b) $I = 2\text{kA}$ (c) $I = 17.4\text{kA}$ (d) $I = 71.3\text{kA}$ (e) $I = 51.7\text{kA}$ (f) $I = 0.1\text{kA}$ 

Fig. 3 PTFE concentration with stream line(upper) and temperature distribution(down) between the contacts at specific periods

여 최대전류값 이후에도 계속 압력상승이 일어나는 것을 잘 예측하고 있으며, 이후의 압력감소는 접점 사이의 아크 플라즈마를 냉각시키는 소호력을 발휘하는데 사용된다.

적용된 난류모델(프란틀 혼합거리 모델과 표준 $k-\epsilon$ 모델)에 따라 아크전압과 압력상승의 계산치가 약간씩 차이가 나는데, 차단현상에 적용되는 난류모델은 대전류 구간에서는 물론 전류영점 부근에서 아크영역의 냉각현상 예측에 중요한 역할을 하기 때문에 체계적인 연구가 필요한 주제이다. 아크전압은 접점 사이에서 발생된 아크 플라즈마의 특성을 나타내는 지표

로 사용될 수 있고, 팽창실 압력상승은 아크 플라즈마로부터 발생된 에너지의 유입 및 유출 특성을 파악할 수 있는 척도로 이용될 수 있다. 첫 번째 전류영점 부근과 최대전류치 이후 전류감소가 급격한 30kA 이후에는 이전까지 축적된 압력에너지가 팽창실로부터 접점 사이로의 유동을 발생시키고, 접점 사이의 아크 플라즈마를 냉각시키는 구간이기 때문에 적용된 난류모델에 따른 아크전압의 차이가 발생하게 됨을 알 수 있다. 열파퍼식 가스차단기에서 발생하는 아크 플라즈마에 적합한 난류모델에 관한 연구는 아직까지 진행된 바가 없으며, 이에

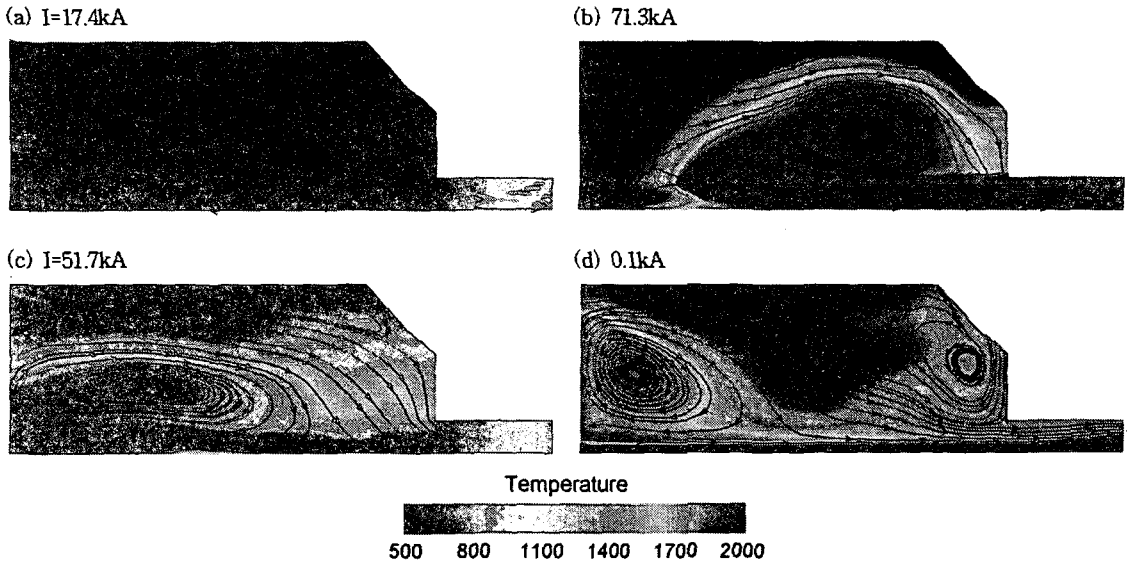


Fig. 4 Temperature distribution with stream line inside the expansion chamber at specific periods

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 점점 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. 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 용삭가스가 MN부에서 발생하여 팽창실 및 좌측 유출구 방향으로 유동이 전개됨을 관찰할 수 있다. 노즐부에서 팽창실을 연결되는 유로의 형상에 따라 와류동(vortex flow)과 유동손실의 크기가 좌우되

므로 이에 관한 최적화 설계가 추가적으로 검토되어야 한다. 그림 3(e)는 FC가 MN부를 모두 빠져나온 시점으로 노즐폐색이 해제되어 양방향으로 유동이 형성되고 전류가 감소함에 따라 점점 사이의 압력보다 팽창실에 축적된 압력이 크게 되면 유동의 방향이 전환되어 점점 방향으로의 흐름이 형성되게 된다. 마지막으로 그림 3(f)는 차단이 이루어지는 두 번째 전류영점 근방으로 방향 전환된 유동이 활발하게 점점 사이의 열가스를 냉각시키고, 유출구 방향으로 빠져나가게 함을 볼 수 있다. 좌측 유출구에 비하여 FC가 위치한 우측 유출구 부근에는 2차유동 및 유동바리 등의 복잡한 유동을 형성하게 되는데, 이러한 유동손실 및 저항을 최소화할 수 있는 노즐유출각 및 노즐목 길이 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 따라 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 개구 이후 점점 사이에서 발생된 아크에너지는 용삭가스와 함께 압력팽창을 유도하고 팽창실로의 유동을 일으키게 된다(그림 3(a)). 입력전류의 크기가 증가함에 따라 팽창실

로 유입되는 에너지 및 PTFE농도도 커지게 되므로 팽창실의 압력은 증가하게 된다(그림 3(b)). 최대전류점을 지난 후에도 노즐폐색현상이 유지되는 동안은 계속적으로 팽창실의 압력에 에너지가 증가하게 되는데 팽창실의 형상에 따라 유입된 열가스 와 기존의 냉가스의 혼합 정도를 좌우한다. 이를 개선하기 위하여 팽창실 내부에 유동안내판(Flow guide) 등의 추가적인 장치를 설치하는 경우도 있다. 이후 입력전류의 크기가 감소함에 따라 접점 사이의 압력은 함께 감소하게 되는데, 팽창실의 압력이 이보다 더 커지게 되면 팽창실에서 접점 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 후기에는 뒷부분에 커다란 와류를 나타내게 한다는 것을 확인할 수 있었다. 팽창실에서 발생하는 와류동은 접점 사이로의 분사력(Blowing force)을 감소시켜 접점 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. 결론

본 논문에서는 현재 초고압 차단기 시장에서 핵심기술로 분류되어 기술개발에 박차를 가하고 있는 새로운 차단방식인 열파파식 가스차단기의 소호특성을 고찰하기 위하여 상용 CFD 코드인 PHOENICS를 바탕으로 로렌츠힘, 주울열 등을 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 접점 사이의 아크 플라즈마를 냉각

시키는 구간이기 때문에 적용된 난류모델에 따라 아크전압의 차이가 발생하게 됨을 확인하였다.

- (3) 팽창실로의 가스흐름 및 접점 사이로의 열유동 특성(온도, 농도 및 유선 등)을 고찰함으로써 열파파식 차단부의 소호 원리를 가시화하였으며, 팽창실과 유로 등에서의 유동손실의 원인 및 정도를 확인하였다.
- (4) 팽창실에서 발생하는 와류동은 접점 사이로의 분사력을 감소시켜 접점 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.

참고문헌

- [1] Schavemaker, P., 2002, "Digital Testing of High-Voltage SF₆ Circuit Breakers," *Dissertation of Delft University of Technology*, p.1-14.
- [2] Garzon, R.D., 2002, *High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications 2nd*, Marcel Dekker, New York, p.18-25.
- [3] Lee, J.C. et al., 2002, "Application of CFD-CAD Integration Techniques for GCB Design," *Proc. 14th Gas Discharge Conference*, Vol.2, p.276-279.
- [4] Lee, J.C. and Kim, Y.J., 2005, "Numerical Modeling of SF₆ Thermal Plasma Generated During the Switching Process," *Thin Solid Films*, Vol.475, Issues 1-2, p.72-80.
- [5] Lee, J.C. and Kim, Y.J., 2005, "Calculation of the Interruption Process of a Self-blast Circuit Breaker," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.41, No.5, p.1592-1595.
- [6] Liebermann, R.W. and Lowke, J.J., 1976, "Radiation Emission Coefficient for Sulphur HexaFluoride," *JQSRT*, Vol.17, p.253-264.
- [7] Frost, L.S. and Liebermann, R.W., 1971, "Composition and

- Properties of SF₆ and Their Use in a Simplified Enthalpy Flow Arc Model,” *Proceedings of the IEEE*, Vol.59, No.4, p. 474-485.
- [8] Zhang, J.L. et al., 2002, “Computational Investigation of Arc Behavior in an Auto-expansion Circuit Breaker Contaminated by Ablated Nozzle Vapor,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol.30, p.706-719.
- [9] Fang, M.T.C. et al., 1994, “Current Zero Behavior of an SF₆ Gas-blast Arc. Part II: Turbulent Flow,” *J. Phys. D., Appl. Phys.*, Vol.17, p.74-83.
- [10] Ruchti, C.B. and Niemyer, L., 1986, “Ablation Controlled Arcs,” *IEEE Trans. on Plasma Science*, Vol.PS-14, p.423-434.
- [11] Chervy, B. et al., 1996, “Calculation of the Interruption Capability of SF₆-CF₄ and SF₆-C₂F₆ Mixtures-Part I: Plasma Properties,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol.24, p.198-217.