

초고압 차단부 아크방전 수치해석 및 난류모델에 관한 연구

이 종 철*¹

STUDY ON NUMERICAL ANALYSIS AND TURBULENCE MODELS FOR ARC DISCHARGES IN HIGH-VOLTAGE INTERRUPTERS

J.-C. Lee*¹

In this study, we calculated arc discharges and flow characteristics driven by arcs in a thermal puffer chamber, which is one of most outstanding high-voltage interrupters, for understanding the complex physics and the probability of thermal breakdown. The four main parts of arc model for this virtual-reality are radiation, PTFE ablation, Cu evaporation, and turbulence. Among these important parts the turbulence model can be critical to the reliability of computation results during the whole arcing history because the plasma flow is affected by high heat energy and mass momentum. Two turbulence models, the Prandtl's mixing length model and the standard $k-\varepsilon$ model, are applied for these calculations and are compared with pressure-rise inside chamber and arc voltage between the contacts as well as flow characteristics near current zero.

Key Words : 아크방전(Arc Discharge), 절연과괴(Breakdown), 초고압 차단부(High-Voltage Circuit Breaker), 연성해석(Coupled-Field Analysis), 난류모델(Turbulence Model)

1. 서 론

전력용 개폐장치 중 하나인 가스차단기(Gas Circuit Breaker, GCB)의 주요 책무인 고장전류차단 과정에서 발생하는 25,000 [K] 이상의 고온 아크 플라즈마 현상에 관한 연구는 제품 설계 및 개발에 필수적이며 신뢰성 향상에도 커다란 기여가 가능하다[1]. 아크 플라즈마를 포함한 고장전류차단 과정에서 발생하는 복합적인 메커니즘을 파악하기 위한 실험적인 접근법은 차단기술의 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 연구방법이 활발히 진행되고 있으며, 이를 수치적 시험(numerical testing or digital testing)으로 명명하기도 한다[2].

아크 플라즈마를 수치적으로 다루기 위해서는 이에 대한 모델링이 필요하며, 유체흐름 및 열역학 법칙에 관련된 방정식을 이용하는 물리적 모델(physical model)과 전기적 관점에서 에너지 평형식을 이용하는 블랙박스 모델(black-box model)로 나누어진다[1,2]. 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[3-5].

본 논문에서는 차세대 초고압 소화방식으로 부각된 열과퍼 챔버(thermal puffer chamber)의 고장전류차단 과정에서 발생하는 아크 플라즈마 현상 및 이에 의한 열유동 특성을 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 기법을 활용하여 계산한다. 특히 강한 압력구배에 의하여 가속되며 반경방향으로의 큰 온도구배를 갖는 난류상태가 되는 아크 플라즈마 유동에 보다 적합한 결과를 도출할 수 있는 난류모델을 검토하고자 0 방정식 모형(0 equation model)인 Prandtl 혼합거리모델과 2 방정식 모형(2 equation model)인 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 이용한 해석결과를 비교한다.

접수일: 2010년 4월 26일, 수정일: 2010년 9월 9일,

게재확정일: 2010년 9월 17일.

1 정회원, 강릉원주대학교 기계자동차공학부

* Corresponding author, E-mail: jcle01@gwnu.ac.kr

2. 본 론

2.1 지배방정식 및 연성해석 방법

가스차단기 소호챔버에서 발생하는 아크 플라즈마에 의한 열유동 특성을 해석하기 위해 요구되는 미분형 방정식은 크게 두 가지로 열유동장을 위한 Navier-Stokes 방정식과 전자기장을 위한 Maxwell 방정식이다. 즉, 이러한 아크 플라즈마 현상을 해석하기 위해서는 이 두 방정식을 연성해석(coupled-field analysis)해야 하며, 이를 위한 보존형 지배방정식은 다음과 같다.

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

Table 1에 열유동장 및 전자기장 해석을 위한 변수(ϕ)에 따른 확산계수(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. 식 (1)에서 극간의 전위분포(φ)를 계산하고 오옴의 법칙(Ohm's law)으로 구한 전류밀도 J 와 아크저항 R 로부터 전계분포(E)를 구하며, 최종적으로는 주울열(σE^2)을 계산할 수 있다. 또한 발생된 전계와 자계에 의한 로렌츠힘($J \times B$)을 고려하여, 접점 사이에서 발생된 아크에 자기펌핑(magnetic pumping) 효과를 나타낼 수 있도록 전류밀도 J 와 아크전류에 의한 원주방향 자계 B 를 다음과 같이 구하였다.

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

여기서 σ 는 전기전도도, μ_0 는 아크 투자율(permeability)이다.

2.2 아크 모델링

앞서 아크 플라즈마 유지 및 거동을 위한 주울열과 로렌츠 힘을 설명하였다. 그 외에도 종합적인 해석을 위해서는 고온의 아크 플라즈마로부터 발생하는 복사에너지와 그로 인한 주변의 PTFE 노즐 용삭(abrasion) 및 금속 전극 용손(evaporation)의 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)이 상당히 만족스러운 결과를 보여주고 있다. 본 연구에서도 순방출계수를 이용한 근사복사모델을 적용하였으며, 순방출계수(net emission coefficient)는 Liebermann & Lowke[6]가 제시한 값을 사용하였다.

아크발생 영역은 절연능력이 우수한 PTFE 노즐로 둘러싸여 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 1.19×10⁴ [kJ/kg]이라 가정하였으며, 이에 사용되는 용삭량 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{m}_1 = (FQ)/h_a \quad (3)$$

여기서 Q 은 노즐 표면에 도달하는 총복사량이며, F는 경험

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	$\mu_l + \mu_t$	$\partial p / \partial z + (J \times B)_z + \text{viscous terms}$
Radial momentum	v	$\mu_l + \mu_t$	$\partial p / \partial r + (J \times B)_r + \text{viscous terms}$
Enthalpy	h	$(k_l + k_t) / c_p$	$dp / dt + \sigma E^2 - q + \text{viscous dissipation}$
Electrostatic potential	φ	σ	0
PTFE concentration	c_{PTFE}	$\rho(D_l + D_t)$	0
Cu concentration	c_{Cu}	$\rho(D_l + D_t)$	0
Turbulent kinetic energy	k	$(\mu_l + \mu_t) / \sigma_k$	$\rho(P_k - \epsilon)$
Turbulent dissipation rate	ϵ	$(\mu_l + \mu_t) / \sigma_\epsilon$	$\rho\epsilon / k (C_{1\epsilon} P_k - C_{2\epsilon} \epsilon)$

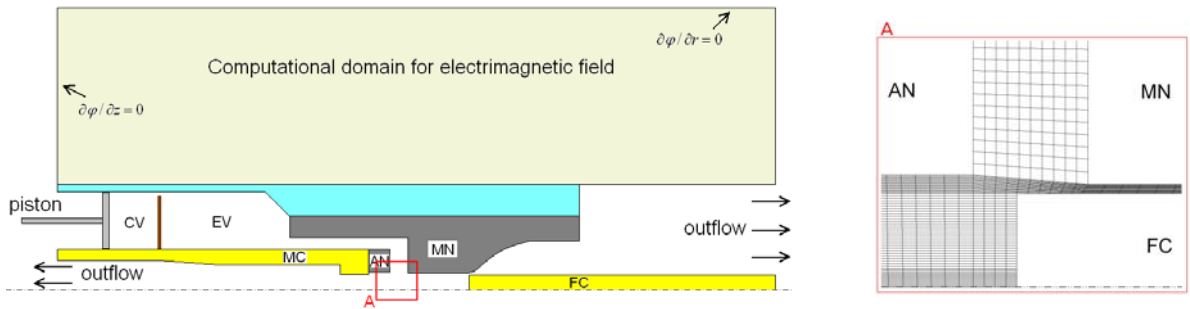


Fig. 1 Schematic diagram of a thermal puffer chamber(left) and mesh formation near arcing zone(right)

상수로 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 원형 영역을 설정하여 아크전류가 이곳에 집중하는 것으로 가정하였다. 구리 전극이 용융점(=1,356 [K])에 도달하면 증기발생이 시작되며 증발량 관계식은 다음과 같다[7].

$$\dot{m}_2 = q_v / h_v \quad (4)$$

여기서 h_v 는 전극 표면을 용융점(=135 [kJ/kg])까지 가열하고, 단위질량의 음극재료(구리)를 상변화(=5,070 [kJ/kg]) 시키는데 요구되는 총에너지이며, q_v 는 금속증발에 사용되는 에너지량이다.

작동유체인 SF₆, PTFE 증기, 구리 증기 등이 혼합된 가스 상태에서 확산은 이러한 증기들의 재분포에 매우 중요한 메커니즘이다. Murphy 등[8]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 (5)을 이용하여 확산계수를 직접 부여하지 않고 Schmidt 수를 지정하여 계산하였으며, 층류와 난류 확산계수로 각각 1의 값을 사용하였다.

$$D_i = \frac{\mu_t}{\rho S c_i}, \quad D_t = \frac{\mu_t}{\rho S c_t} \quad (5)$$

아크 플라즈마 영역에서의 난류 모델링 또한 매우 어려운 문제 중 하나이다. Fang 등은 Prandtl의 혼합거리모델을 수정

하여 SF₆ 노즐[9] 및 자력팽창 소호부[10] 아크유동에 성공적으로 적용하였다. 본 연구에서는 난류점성(turbulent viscosity)을 구하기 위하여 식 (6)과 같이 아크영역을 5,000 [K] 이상으로 가정할 수 정된 Prandtl 혼합거리모델과 식 (7-8)과 같이 표준 k-ε 모델을 사용하여 비교하였다.

$$\mu_t = \rho (c_1 \delta) \left[2 \left(\frac{v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon \quad (7)$$

$$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (8)$$

3. 결 과

3.1 아크이력구간에서의 열유동 특성

본 연구에 사용된 열과퍼 챔버의 개략도 및 수치계산을 위한 유동장 및 전기장 경계조건을 Fig. 1에 나타내었다. 열과퍼 챔버는 한 쌍의 구리 금속전극(이동전극(MC)과 고정전극(FC)), PTFE 노즐(MN, AN), 피스톤으로 구성되어 있으며, 압축력을 얻기 위한 챔버는 격벽에 의하여 압축실(compression volume, CV)과 팽창실(expansion volume, EV)로 구분된다. 팽창실과 압축실은 가변밸브로 연결되어 있으나 본 연구에서는 해석의 편의를 위하여 이를 고려하지 않으며, 압축실의 피스톤 운동속도와 FC 이동속도를 8 [m/s]로 일정하다고 가정하였다. 계산에 적용된 유동장 및 전기장 경계조건으로는 실린더 좌표에서의 축대칭 조건을 사용하였으며, 챔버의 초기 SF₆ 가스압력은 실제와 같은 0.65 [MPa]을 부여하였고, 유입구는 없으며 유출구는 좌우로 모델링하였다. 또한 전자기 해석결과의 안정성을 위하여 유동해석 영역보다 크게 설정하였고, 정전위 포텐셜을 계산하기 위한 경계조건으로 MC 좌측면 100 [V],

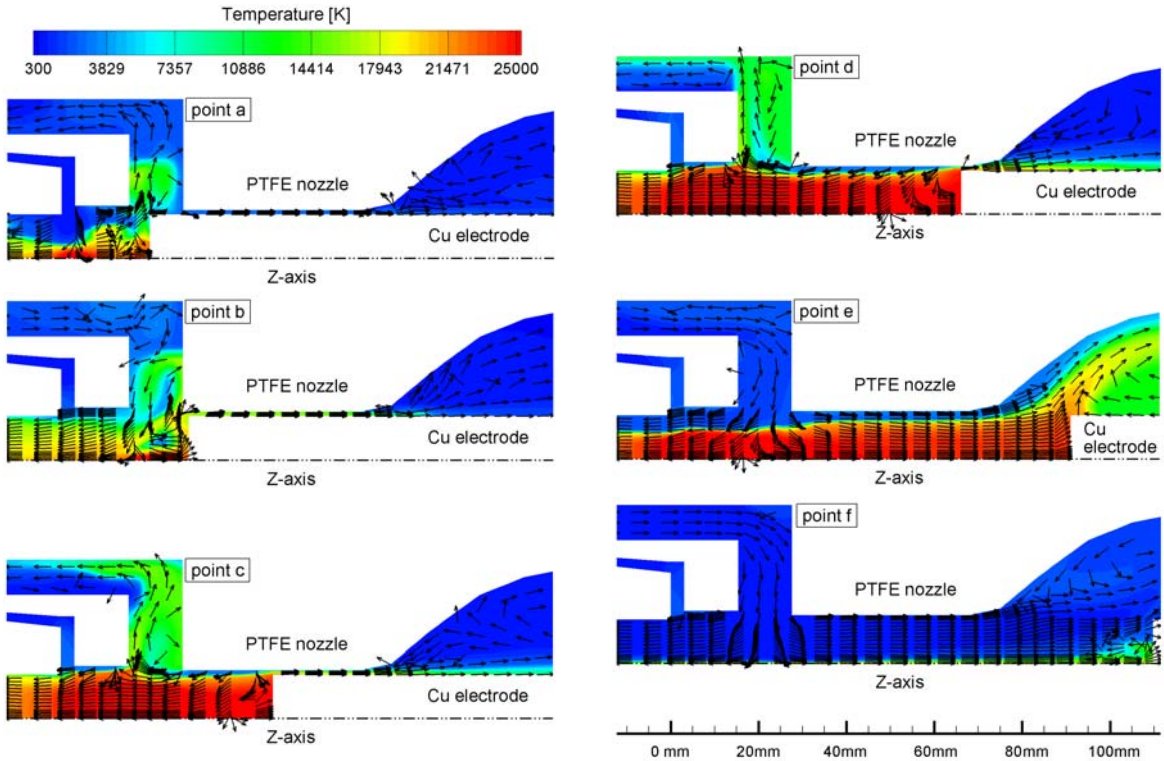


Fig. 2 Evolution of the arc column in terms of temperature and flow pattern during arc history

FC 유측면 0 [V]로 지정하였다. 전체계산시간은 아크시간 (arcing time)인 13.1 [ms], 투입전류는 최대 50 [kA_{rms}](=71.3 [kA])이며, 전류영점 직전 부근인 100 [A]까지 해석을 수행하였다. 계산에 사용된 격자수는 축방향 155개, 반경방향 116개 (155×116)이며, 아크영역에서의 급격한 온도구배에 대응하기 위하여 반경방향으로 시작되는 첫 10 [mm] 구간동안 45개를 집중 배치시켰다. 팽창실과 노즐이 연결되는 유로에서의 격자 크기는 대략 1 [mm] × 0.8 [mm]이다. 해석영역 중 격자수에 가장 민감한 부분인 아크영역에서의 격자수 영향을 검토하기 위하여 양방향으로 두 배까지 늘려가며 검토한 결과, 최대 차이는 아크온도 2%, PTFE 및 Cu 농도 3% 정도였으며, 다른 변수에 관한 차이는 무시될만한 수준이었다. 총 계산 소요시간은 인텔 i5 2.67GHz CPU (Quad-Core, RAM 4GB)를 이용하여 12시간 정도이다.

차단과정에서 발생하는 아크 플라즈마에 의한 온도분포 및 유동특성을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에 표현된 속도벡터는 독자의 이해를 돕기 위하여 출력개수를 줄인 것으로 실제 사용된 격자는 그림 1에 나타내었다. 검토에 사용된 시점 "a"에서 "f"의 시간과 전류크기는 각각 "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]), "d" (t=7.72 [ms], I=71.3 [kA]), "e" (t=10.9 [ms], I=39.7 [kA]), "f" (t=13.1 [ms], I=0.1 [kA]) 이다. 점점 이동의 초기 단계인 시점 "a"에서는 FC가 PTFE 노즐을 폐쇄한 상태이므로 MC와 FC 사이에서 발생한 아크 에너지의 대부분은 좌측의 유동 출구로 빠져 나가며, 일부는 상부 유로를 따라 팽창실로 유입되는 것을 볼 수 있다. 시점 "b"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 현상으로서 에너지 보존의 측면에서 타당성 있는 결과라 할 수 있다. 시점 "c"는 전류가 상승하는 부분으로서 아크 영역에 공급된 큰 에너지가 좌측 유출구 및 상부 유로로의 활발한 흐름을 발생시키고 있음을 확인할 수 있다. 시점 "d"에서는 최대전류값이 입력되기 때문에 더욱 활발한 상부 유로를 통한 팽창실로의 에너지 유입을 나타내고 있다. 시점 "e"는 최대전류값을 지나 에너지 입력이 하향곡선에 접어선 시점이며, FC가 PTFE 노즐 목을 빠져 나온 상태이므로 좌우 유출구로의 유출량이 증가한다. 따라서 그 동안 축적된 팽창실의 입력에너지가 아크 영역보다 크기 때문에 이전과는 다르게 팽창실에서 아크 영역

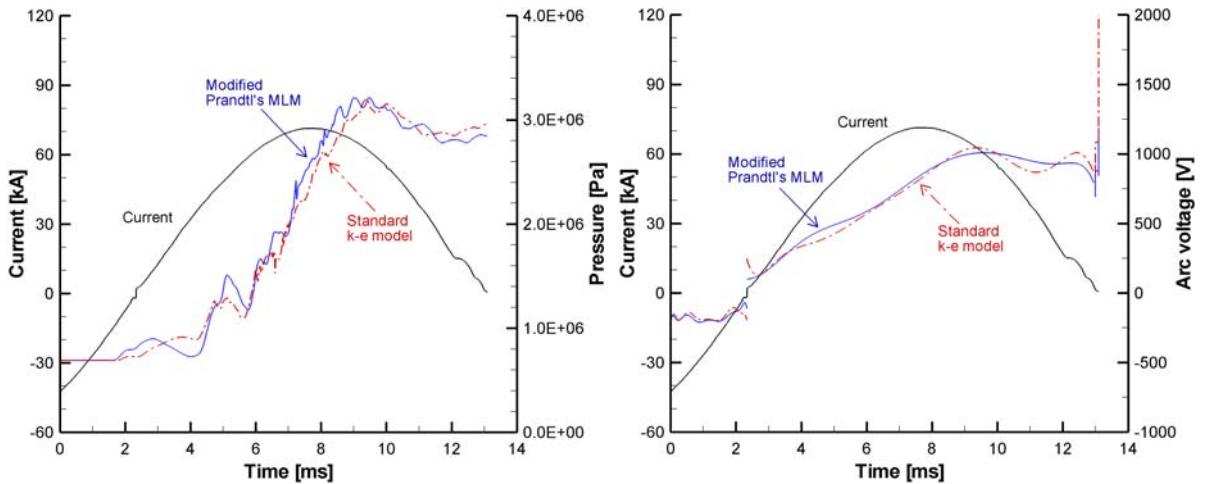


Fig. 3 Comparisons of pressure-rise inside the chamber(left) and arc voltage(right) with two different turbulent models

으로의 흐름이 나타남을 확인할 수 있다. 이는 열과퍼 챔버의 전형적인 특성을 나타내는 것이며, 상부 유로의 흐름방향 전환 시점은 챔버 설계에 매우 중요한 요소가 된다. 시점 "f" ($t=13.1$ [ms], $I=0.1$ [kA])은 전류영점 직전으로 이전의 대전류 구간 동안 축적된 팽창실의 압력에너지에 의하여 아크영역으로의 흐름을 발생시켜 두 접점 사이에 발생되었던 고온의 플라즈마를 냉각시키고 작동가스의 절연능력을 원활히 회복시키는 역할을 수행하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 열과퍼 챔버에서의 아크 플라즈마 및 유동 특성의 시간적 변화를 분석함으로써 접점 사이에 발생한 아크 플라즈마의 물리적 원리를 이해하고, 챔버의 최적 설계에 유용하게 사용할 수 있다.

3.2 난류모델에 따른 팽창실 압력 및 아크전압 변화

난류모델에 따른 전체 계산구간에서의 아크전류에 대한 팽창실 압력상승과 아크전압의 해석결과를 Fig. 3에 나타내었다. 팽창실의 압력상승은 접점 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. 노즐폐색 현상 등에 의하여 최대전류값 이후에도 약 3 [MPa]까지 계속 압력상승이 일어나는 것을 잘 예측하고 있으며, 상승된 팽창실 압력은 전류영점 부근에서 접점 사이의 아크 플라즈마를 냉각시키는 소호력을 발휘하는데 사용된다. 최대 전류값 부근에서의 아크전압 크기는 약 800 [V]를 나타내고 있으며, 전류영점 부근(100 [A])에서는 아크전압이 급상승하는데 이것은 접점 사이의 아크 플라즈마가

상승된 팽창실 압력에 의해 만들어진 유동에 의하여 급격히 냉각되고 있음을 의미한다.

적용된 난류모델(수정된 Prandtl 혼합거리 모델과 표준 k-e 모델)에 대하여 대전류 구간에서의 아크전압과 압력상승 패턴은 유사하지만, 전류영점 부근에서는 상대적으로 큰 차이가 나타남을 볼 수 있다. 이것은 대전류 구간에서 축적된 압력에너지가 전류영점 부근에서 팽창실로부터 접점 영역으로의 유동을 발생시키고 접점 사이의 아크를 냉각시키는 구간이기 때문에 적용된 난류모델에 따른 아크전압과 압력상승 패턴의 차이가 발생하는 것으로 사료된다. 따라서 적용된 난류모델이 전체차단과정(whole arcing history) 특히 전류영점 부근에서 아크영역의 냉각현상 예측에 중요한 역할을 하기 때문에 이에 관한 체계적인 연구가 필요한 주제이다.

3.3 난류모델에 따른 전류영점 부근의 열유동 특성

Fig. 3에서 설명한 난류모델에 따른 압력상승과 아크전압 패턴 차이가 접점 사이의 냉각 수준 때문임을 확인하기 위하여, 적용된 난류모델에 따른 전류영점 직전인 100 [A]에서의 팽창실 내부 및 접점 사이의 온도분포와 유선형상을 그림 4에 나타내었다. Fig. 3의 팽창실 압력상승에서 살펴본 바와 같이 표준 k-e 모델을 사용한 경우에서 최대전류값 이후 전류영점 부근까지의 압력을 더 높게 예측하였는데, 이것은 전류영점 부근에서의 팽창실에서 접점 사이로의 유동이 더 잘 분출됨을 의미한다. 따라서 전류영점 부근에서의 접점 사이 존재하는 아크 플라즈마가 더 잘 냉각될 것이며, 이로 인하여 아크전압 상승이 더 크게 발생하는 것을 초래한다. Fig. 4 상부의 팽창실 유동패턴에서도 팽창실에서 접점 사이로의 보다

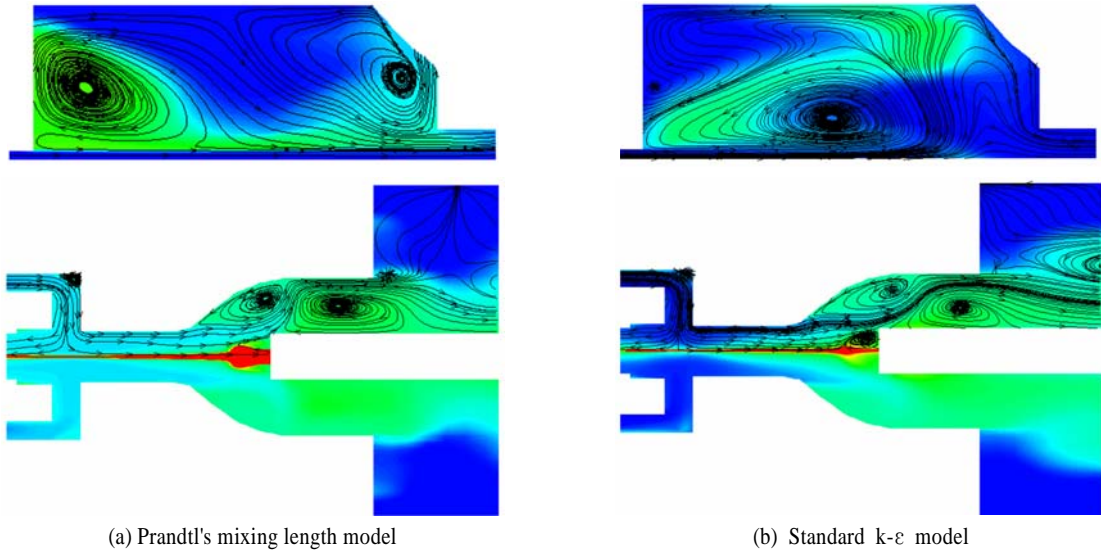


Fig. 4 Temperature distributions and flow characteristics inside EV and between the contacts near current zero with two different turbulent models

큰 압력구배로 인한 원활한 흐름을 볼 수 있어 이와 같은 현상을 잘 나타내고 있으며, Fig. 4 하부의 점점 사이 온도분포 또한 표준 k- ϵ 모델을 사용한 경우에서 Prandtl 혼합거리 모델을 사용한 경우보다 얇은 직경을 갖는 잔류아크를 볼 수 있다. 즉 도전성을 띄는 아크 플라즈마의 반경이 작아질수록 저항이 커지게 되므로 주어진 전류에 대한 전압값이 상승한다. 열과퍼식 가스차단부에서 발생하는 아크 플라즈마에 적합한 난류모델에 관한 연구는 아직까지 체계적으로 연구되어진 바가 없으며, 실험데이터와의 비교를 통한 최적의 난류모델 개발은 추후 지속적인 연구를 통해서 보완하고자 한다.

4. 결 론

본 논문에서는 차세대 초고압 소호방식으로 부각된 열과퍼 챔버의 고장전류차단 과정에서 발생하는 아크 플라즈마 현상 및 이에 의한 열유동 특성을 계산하였고, 강한 압력구배에 의하여 가속되며 반경방향으로의 큰 온도구배를 갖는 난류상태가 되는 아크 플라즈마 유동에 보다 적합한 결과를 도출할 수 있는 난류모델을 검토하고자 Prandtl 혼합거리모델과 표준 k- ϵ 모델을 이용한 해석결과를 비교하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 아크이력구간에서의 아크 플라즈마 및 이로 인해 발생되는 열유동특성의 시간적 변화를 분석함으로써 두 점점 사이

에 발생된 아크 플라즈마의 물리적 원리를 이해하고, 챔버의 최적 설계에 유용하게 사용될 수 있다.

(2) 계산된 최대 전류값 부근에서의 아크전압 크기는 약 800 [V]를 나타내었으며, 전류영점 부근에서 아크냉각에 의한 아크전압 급상승 현상을 잘 예측하였다.

(3) 적용된 난류모델에 따라 전류영점 부근에서 팽창실 압력 상승 및 아크전압이 대전류 구간과 비교했을 때 상대적으로 큰 차이를 나타낸 것은 전류영점 부근에서 팽창실로부터 점점 영역으로의 유동을 발생시키고 점점 사이의 아크를 냉각시키는 구간이기 때문으로 사료된다.

(4) 표준 k- ϵ 모델을 사용한 경우에서 Prandtl 혼합거리 모델을 사용한 경우보다 최대전류값 이후 전류영점 부근까지의 압력을 더 높게 예측하였고, 팽창실에서 점점 사이로의 보다 큰 압력구배로 인한 원활한 흐름으로 점점 사이의 아크 플라즈마 직경이 더 얇은 것을 확인하였다.

(5) 열과퍼식 가스차단부에서 발생하는 아크 플라즈마에 적합한 난류모델에 관한 연구는 아직까지 체계적으로 연구되어진 바가 없으며, 실험데이터와의 비교를 통한 최적의 난류모델 개발은 추후 지속적인 연구를 통해서 보완하고자 한다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2010-0015555).

참고문헌

- [1] 2002, Garzon, R.D., *High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications 2nd*, Marcel Dekker, New York, pp.18-25.
- [2] 2002, Schavemaker, P., *Digital Testing of High-Voltage SF₆ Circuit Breakers*, Dissertation of Delft University of Technology, Netherlands.
- [3] 2007, Lee, J.C. and Kim, Y.J., "Effects of a Flow Guide on the Arcing History in a Thermal Puffer Plasma Chamber," *Transaction of the KSME(B)*, Vol.31, No.10, pp.832-839.
- [4] 2007, Lee, J.C., Boo, J.H. and Kim, Y.J., "Changes of Electrical Conductivity and Temperature Caused by Electrode Erosion for Atmospheric Plasma Systems," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol.51, No.3, pp.972-977.
- [5] 2010, Lee, J.C. and Kim, Y.J., "Computational Investigation of Thermal Plasmas in a SF₆ Chamber with Different Applied Currents," *Modern Physics Letters B*, Vol.24, No.13, pp.1341-1344.
- [6] 1976, Liebermann, R.W. and Lowke, J.J., "Radiation Emission Coefficient for Sulphur HexaFluoride," *JQSRT*, Vol.17, pp.253-264.
- [7] 1999, 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.
- [8] 1993, Murphy, A.B., "A Comparison of Treatments of Diffusion in Thermal Plasma," *J. Appl. Phys.*, Vol.29, pp.1922-1932.
- [9] 1999, Yan, J.D., Nuttall, K.I. and Fang, M.T.C., "A Comparative Study of Turbulence Models for SF₆ arcs in a Supersonic Nozzle," *J. Appl. Phys.*, Vol.32, pp.1401-1406.
- [10] 2002, 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. on Plasma Sci.*, Vol.30, No.2, pp.706-719.